



**TUGAS AKHIR - TF 141581**

**OPTIMASI PENGGUNAAN LISTRIK SISTEM  
PENDINGIN GEDUNG KOMERSIAL DI INDONESIA  
MENGUNAKAN *THERMAL ENERGY STORAGE***

**AKHMAD FARUQ ALHIKAMI  
NRP. 2411100026**

**Dosen Pembimbing  
Totok Ruki Biyanto, Ph.D.  
Dr Gunawan Nugroho, ST.,MT.**

**JURUSAN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2015**



FINAL PROJECT - TF 141581

***OPTIMIZATION OF COOLING SYSTEM IN  
COMMERCIAL BUILDINGS USING THERMAL  
ENERGY STORAGE***

AKHMAD FARUQ ALHIKAMI  
NRP. 2411100026

Supervisor  
Totok Ruki Biyanto, Ph.D.  
Dr Gunawan Nugroho, ST.,MT.

DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2015

**OPTIMASI PENGGUNAAN LISTRIK SISTEM  
PENDINGIN GEDUNG KOMERSIAL DI INDONESIA  
MENGUNAKAN *THERMAL ENERGY STORAGE***

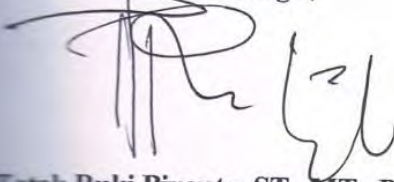
**TUGAS AKHIR**

**Oleh:**

**Akhmad Faruq Albikami**  
**NRP. 2411100026**

**Surabaya, Januari 2015**  
**Mengetahui / Menyetujui**

**Pembimbing I,**



**Tatok Ruki Bivanto, ST., MT., Ph.D.**  
**NIPN. 197107021998021001**

**Pembimbing II,**



**Dr. Gunawan Nugroho, ST., MT.**  
**NIPN. 197711272002121002**

**Ketua Jurusan**  
**Teknik Fisika FTI – ITS**



**Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA.**  
**NIPN. 196503091990021001**

**OPTIMASI PENGGUNAAN LISTRIK SISTEM  
PENDINGIN GEDUNG KOMERSIAL DI INDONESIA  
MENGUNAKAN *THERMAL ENERGY STORAGE***

**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada







Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi  
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**AKHMAD FARUQ ALHIKAMI**

NRP. 2411100026

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Totok Ruki Biyanto, ST., MT., Ph.D.  (Pembimbing I)
2. Dr. Gunawan Nugroho, ST., MT.  (Pembimbing II)
3. Dr. Ir. Ali Musyafa', MSc.  (Ketua Penguji)
4. Ir. Matradji, MSc.  (Penguji I)
5. Hendra Cordova, ST., MT.  (Penguji II)
6. Arief Abdurrahman, ST., MT.  (Penguji II)

**SURABAYA  
JANUARI 2015**

**OPTIMASI PENGGUNAAN LISTRIK SISTEM  
PENDINGIN GEDUNG KOMERSIAL DI INDONESIA  
MENGUNAKAN *THERMAL ENERGY STORAGE***

**Nama** : Akhmad Faruq Alhikami  
**NRP** : 2411100026  
**Jurusan** : Teknik Fisika FTI – ITS  
**Pembimbing I** : Totok Ruki Biyanto, ST., MT., Ph.D.  
**Pembimbing II**: Dr Gunawan Nugroho, ST., MT.

**Abstrak**

Penelitian ini melakukan investigasi tentang optimasi sistem pendingin menggunakan *Thermal Energy Storage* pada gedung komersial. Penggunaan sistem pendingin di gedung komersial mencapai 50 % dari total konsumsi energi gedung. Pemerintah Indonesia menetapkan biaya penggunaan listrik yang mahal untuk gedung komersial. Perusahaan Listrik Negara menetapkan harga waktu beban puncak mencapai dua kali luar waktu beban puncak. TES merupakan solusi alternatif, yang menggeser beban listrik selama waktu beban puncak yang tarifnya mencapai dua kali periode luar waktu beban puncak. Dalam hal ini, *chiller* menghasilkan air dingin (*chilled water*) untuk mencapai beban pendinginan yang diperlukan dan disimpan ke dalam TES *tank*. TES *tank* akan mengurangi rentang operasi kapasitas total *chiller*. Namun *heat loss* pada TES *tank* harus di pertimbangkan karena *heat loss* yang lebih besar akan menyebabkan kapasitas total *chiller* dan biaya investasi pada setiap gedung dan kombinasi antar gedung komersial akan semakin besar. Dalam penelitian ini, terdapat 11 kombinasi gedung komersial yang akan diterapkan dalam beberapa variabel optimasi. Penelitian ini melakukan optimasi kapasitas total *chiller*, beban pendinginan gedung dan *heat loss* yang minimum dengan menggunakan *simplex*

*linier programming*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penghematan rata rata gedung komersial mencapai 19,6 %.

**Kata Kunci:** *Beban pendinginan, Gedung komersial, Thermal energy storage, simplex linier programming.*

## ***OPTIMIZATION OF COOLING SYSTEM IN COMMERCIAL BUILDINGS USING THERMAL ENERGY STORAGE***

***Name*** : Akhmad Faruq Alhikami  
***NRP*** : 2411100026  
***Department*** : Teknik Fisika FTI – ITS  
***1<sup>st</sup> Supervisor*** : Totok Ruki Biyanto, ST., MT., Ph.D.  
***2<sup>nd</sup> Supervisor*** : Dr Gunawan Nugroho, ST., MT.

### ***Abstract***

The cooling system optimization using Thermal Energy Storage (TES) in commercial buildings is investigated in this research. The use of cooling systems in commercial buildings is up to 50% of total energy consumption. This consumes expensive electricity cost according to electricity tariffs determined by Indonesian Government. Indonesian state electricity company set prices peak load up to twice the price outside peak hours. TES is an alternative solution, shifting the use of electrical load during the peak period which the tariff is twice as the off peak period. In this case, chiller produces cold water to achieve the required cooling load and save to the TES tank. The TES tank will reduce the chiller total capacity operating range. However heat loss at the TES tank has to be considered because greater heat loss will require additional total chiller capacity and investment costs at each buildings and their combination. In this research, as 11<sup>th</sup> combination of commercial buildings, which applied optimization on several competing variables. The optimization is minimizing the combined of total chiller capacity, cooling load of the building and heat loss using simplex linear programming. The results show that 19.6% savings of the average of commercial buildings.

***Keywords:*** *cooling load, commercial building, Thermal energy storage, simplex optimization*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur senantiasa terpanjatkan kepada Allah SWT, serta sholawat dan salam tetap tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW. Karena atas berkah, rahmat, petunjuk dan karunia Alloh dan Rosul-Nya penulis mampu untuk melaksanakan dan menyelesaikan Tugas Akhir sebagai prasyarat untuk memperoleh gelar Sajana Teknik, dengan judul **Optimasi Penggunaan Listrik Sistem Pendingin Gedung Komersial di Indonesia menggunakan *Thermal Energy Storage***.

Tentunya dalam penyelesaian Tugas Akhir ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua orang yang ikut membantu penulis dalam menyelesaikan penyelesaian Tugas Akhir ini. Oleh karena itu pada kesempatan berharga ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Keluarga besar, Bapak, Ibu, dan adik-adiku tersayang yang telah memberikan doa dan dukungannya.
2. Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika FTI-ITS Surabaya.
3. Ir Tutug Dhanardhono, MT. selaku dosen wali yang telah memberikan pengarahan selama tujuh semester dengan penuh kesabaran.
4. Totok Ruki Biyanto, ST., MT., P.hD selaku dosen pembimbing I yang telah sabar memberikan petunjuk tentang green building dan optimasinya.
5. Dr Gunawan Nugroho, ST., MT selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan petunjuk tentang segala hal berkaitan dengan teori-teori efisiensi energi.
6. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika yang telah memberikan banyak ilmu dan wawasan selama kuliah.
7. Teman-teman asisten Laboratorium Pengukuran Fisis Teknik Fisika ITS.
8. Hardhian Restu, Riza Aris, Nur Kholish, Moammar Arief, Biga Arisandi, Anton Widodo, Zainul Arifin, Afif Rachman, Bazi Aji, Yori Milzam, Franky kusuma atas doa dan dukungannya.



9. Teman-teman anggota Koperasi Mahasiswa dr Angka ITS, Pengurus dan Pengawas atas dukungannya.

Penulis menyadari bahwa dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini masih banyak kesalahan dan kekurangan. dan dalam penulisan laporan Tugas Akhir ini masih dimungkinkan adanya beberapa kesalahan yang tidak penulis sengaja. Oleh karena itu penulis akan dengan senang hati menerima kritik dan saran yang membangun demi kesempurnaannya.

Surabaya, Januari 2015

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	ix
KATA PENGANTAR .....	xi
DAFTAR ISI .....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xv
DAFTAR TABEL .....	xvii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Permasalahan.....	4
1.3 Ruang Lingkup Penelitian .....	4
1.4 Tujuan.....	5
1.5 Manfaat.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Sektor Komersial.....	7
2.2 Profil Beban Listrik Gedung Komersial.....	7
2.3 Tarif Tenaga Listrik Sektor Komersial.....	10
2.4 Thermal Energy Storage.....	10
2.5 Perhitungan Konsumsi Energi TES.....	12
2.6 Penurunan Temperatur dan <i>Heat loss</i> pada TES <i>tank</i> ..	15
2.7 Perhitungan Biaya Investasi .....	18
2.8 Metode Simplex Linier Programming.....	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	21
3.1 Objek Penelitian .....	21
3.2 Sistem Pendingin konvensional Gedung Komersial ...	25
3.3 Sistem Pendingin menggunakan TES gedung komersial .....	26
3.4 Optimasi .....	27
3.5 Diagram Alir Penelitian.....	29
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	35
4.1 Hasil Perhitungan Konsumsi Energi <i>Chiller Plant</i> .....	35
4.2 Hasil Simulasi Menggunakan Simplex LP .....	37
4.3 Analisis Biaya Penghematan Listrik .....	42

4.4 Analisis Biaya Investasi.....	46
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....	53
5.1 Kesimpulan.....	53
5.2 Saran.....	54
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

## DAFTAR TABEL

	Hal.
Tabel 2.1. Data profil beban listrik gedung komersial terhadap waktu	8
Tabel 2.2. Tarif tenaga listrik	10
Tabel 3.1. Profil beban pendinginan gedung komersial	21
Tabel 3.2. Profil beban pendinginan kombinasi gedung	21
Tabel 4.1. Perhitungan energi sistem pendingin pusat perbelanjaan	35
Tabel 4.2. Hasil perhitungan <i>chiller plant</i> gedung komersial	36
Tabel 4.3. Hasil perhitungan <i>chiller plant</i> kombinasi gedung	36
Tabel 4.4. Hasil optimasi kapasitas <i>chiller</i> dan TES <i>tank</i> pada setiap gedung komersial	39
Tabel 4.5. Hasil optimasi kapasitas <i>chiller</i> dan TES <i>tank</i> pada kombinasi gedung komersial	42
Tabel 4.6. Biaya penghematan listrik setiap gedung komersial	44
Tabel 4.7. Biaya penghematan listrik kombinasi gedung	44
Tabel 4.8. Biaya investasi sistem pendingin konvensional gedung pusat perbelanjaan	46
Tabel 4.9. Biaya investasi sistem pendingin menggunakan TES gedung pusat perbelanjaan	47
Tabel 4.10. Biaya investasi dan biaya penghematan sistem TES pada gedung komersial	47
Tabel 4.11. Hasil perhitungan <i>payback period</i> dan ROI pada kombinasi gedung komersial	48

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR GAMBAR

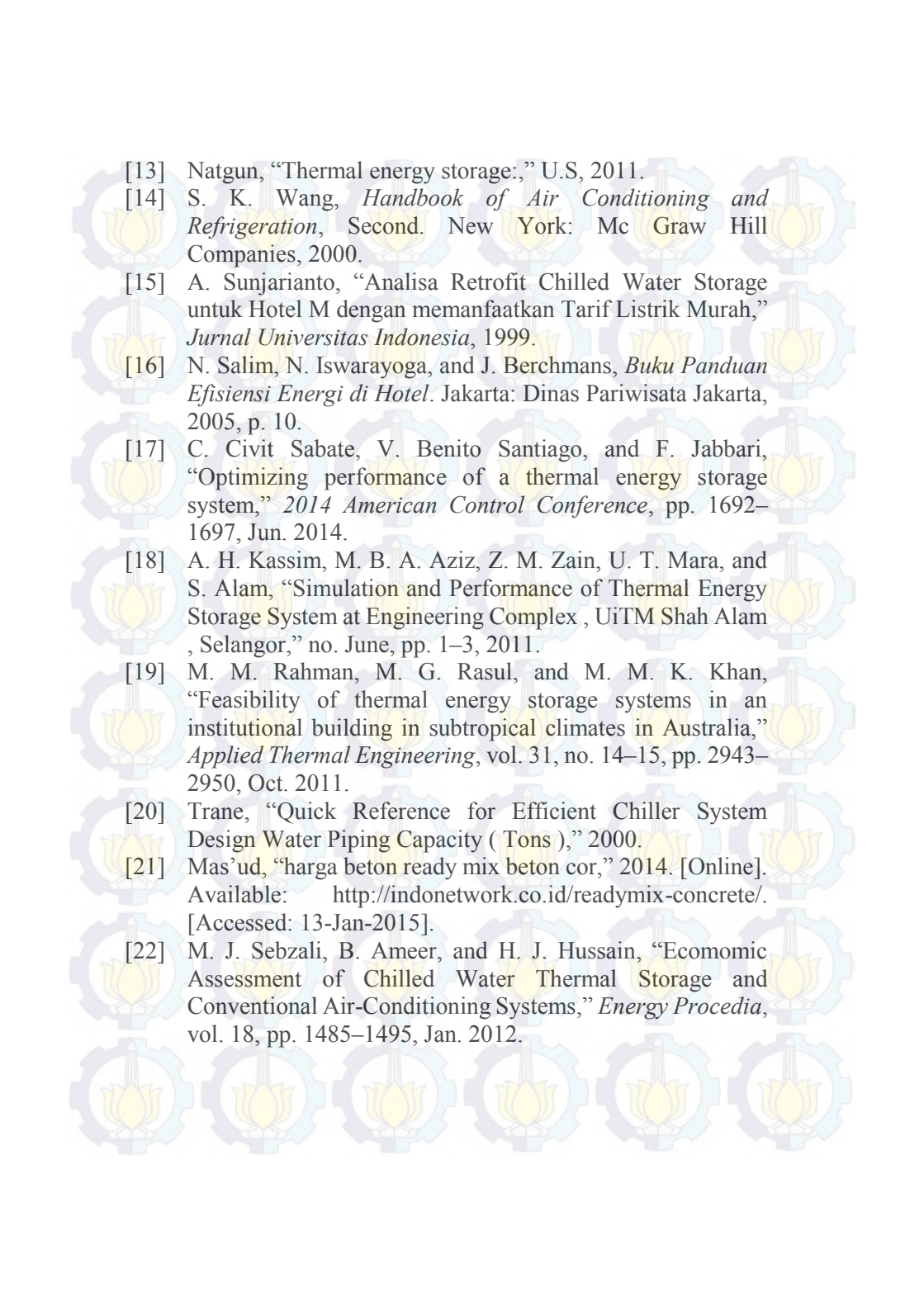
	Hal.
Gambar 1.1. Distribusi penggunaan listrik sektor komersial	2
Gambar 2.1. Profil beban listrik gedung komersial terhadap waktu	9
Gambar 2.2. Skema sistem <i>thermal energy storage</i>	11
Gambar 2.3. Profil temperatur dan <i>thermocline</i> pada TES <i>tank</i> .	16
Gambar 2.4. Kurva temperatur <i>chilled water</i> terhadap volume TES <i>tank</i> selama proses <i>charging</i> dan <i>discharging</i> .	17
Gambar 3.1. Profil beban pendinginan gedung komersial terhadap waktu	22
Gambar 3.2. Profil beban pendinginan kombinasi gedung terhadap waktu	22
Gambar 3.3. Sistem pendingin konvensional	23
Gambar 3.4. Skema sistem pendingin menggunakan TES	23
Gambar 3.5. Diagram Alir Penelitian	24
Gambar 4.1. Profil beban pendinginan gedung pusat perbelanjaan terhadap waktu, kapasitas <i>chiller</i> terhadap waktu, proses <i>charging</i> dan <i>discharging</i> terhadap waktu	29
Gambar 4.2. Profil kapasitas TES <i>tank</i> terhadap waktu dan <i>heat loss</i> pada TES <i>tank</i> terhadap waktu	35
Gambar 4.3. Profil beban pendinginan kombinasi 1,2,3,4 terhadap waktu, Kapasitas <i>chiller</i> terhadap waktu, proses <i>charging</i> dan <i>discharging</i> terhadap waktu	36
Gambar 4.4. Profil kapasitas TES <i>tank</i> terhadap waktu dan <i>heat loss</i> pada TES <i>tank</i> terhadap waktu untuk kombinasi 1,2,3,4	38
Gambar 4.5. Profil biaya penggunaan listrik sistem	39

	pendingin gedung pusat perbelanjaan menggunakan TES dan tanpa TES terhadap waktu	
Gambar 4.6.	Grafik hubungan beban pendinginan gedung saat WBP dengan biaya penghematan listrik	40
Gambar 4.7.	Grafik hubungan kapasitas <i>chiller</i> terhadap beban pendinginan	43
Gambar 4.8.	Grafik hubungan kapasitas <i>chiller</i> terhadap biaya investasi sistem TES	48
Gambar 4.9.	Grafik hubungan beban pendinginan terhadap <i>payback period</i>	49
Gambar 4.10.	Grafik hubungan kombinasi beban pendinginan terhadap ROI	49

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Pusdatin, *Handbook of Energy & Economic of Indonesia*, 9th ed. Jakarta, 2012.
- [2] B. Besar and T. Energi, “Perencanaan Efisiensi dan Elastisitas Energi 2012,” Jakarta, 2012.
- [3] K. ESDM, *Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No 30*. 2012.
- [4] S. M. Hasnain, S. H. Alawaji, a. M. Al-Ibrahim, and M. S. Smiai, “Prospects of cool thermal storage utilization in Saudi Arabia,” *Energy Conversion and Management*, vol. 41, no. 17, pp. 1829–1839, Nov. 2000.
- [5] R. A. Parson, *ASHRAE 1997 Handbook Preface*, 1997th ed. Atlanta, Georgia: American Standard of heating ventilation and air conditioning engineers, 1997.
- [6] A. H. Kassim, M. Z. Hussin, M. B. a. Aziz, and Z. M. Zain, “Power consumption saving during charging period for Thermal Energy Storage System,” *2012 IEEE Control and System Graduate Research Colloquium*, no. Icsgrc, pp. 166–170, Jul. 2012.
- [7] A. Bhatia, “Air Conditioning with Thermal Energy Storage,” no. 877.
- [8] J. Fan and S. Furbo, “Thermal stratification in a hot water tank established by *heat loss* from the tank,” *Solar Energy*, vol. 86, no. 11, pp. 3460–3469, 2012.
- [9] M. Harmon, *Step-By-Step Optimization Excel Solver The Excel Statistical Master*. 2011, p. 235.
- [10] K. M. Powell, W. J. Cole, U. F. Ekarika, and T. F. Edgar, “Optimal chiller loading in a district cooling system with thermal energy storage,” vol. 50, 2013.
- [11] E. I. Mackie, G. Reeves, G. R. Associates, C. C. Hiller, and R. D. Wendland, “Stratified Chilled-Water Storage Design Guide,” New Jersey, 1988.
- [12] E. I. Mackie, G. Reeves, G. R. Associates, C. C. Hiller, and R. D. Wendland, “Commercial Cool Storage Design Guide,” New Jersey, 1985.



- 
- [13] Natgun, "Thermal energy storage:," U.S, 2011.
- [14] S. K. Wang, *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration*, Second. New York: Mc Graw Hill Companies, 2000.
- [15] A. Sunjarianto, "Analisa Retrofit Chilled Water Storage untuk Hotel M dengan memanfaatkan Tarif Listrik Murah," *Jurnal Universitas Indonesia*, 1999.
- [16] N. Salim, N. Iswarayoga, and J. Berchmans, *Buku Panduan Efisiensi Energi di Hotel*. Jakarta: Dinas Pariwisata Jakarta, 2005, p. 10.
- [17] C. Civit Sabate, V. Benito Santiago, and F. Jabbari, "Optimizing performance of a thermal energy storage system," *2014 American Control Conference*, pp. 1692–1697, Jun. 2014.
- [18] A. H. Kassim, M. B. A. Aziz, Z. M. Zain, U. T. Mara, and S. Alam, "Simulation and Performance of Thermal Energy Storage System at Engineering Complex , UiTM Shah Alam , Selangor," no. June, pp. 1–3, 2011.
- [19] M. M. Rahman, M. G. Rasul, and M. M. K. Khan, "Feasibility of thermal energy storage systems in an institutional building in subtropical climates in Australia," *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no. 14–15, pp. 2943–2950, Oct. 2011.
- [20] Trane, "Quick Reference for Efficient Chiller System Design Water Piping Capacity ( Tons )," 2000.
- [21] Mas'ud, "harga beton ready mix beton cor," 2014. [Online]. Available: <http://indonetnetwork.co.id/readymix-concrete/>. [Accessed: 13-Jan-2015].
- [22] M. J. Sebzali, B. Ameer, and H. J. Hussain, "Economic Assessment of Chilled Water Thermal Storage and Conventional Air-Conditioning Systems," *Energy Procedia*, vol. 18, pp. 1485–1495, Jan. 2012.

# **BAB I**

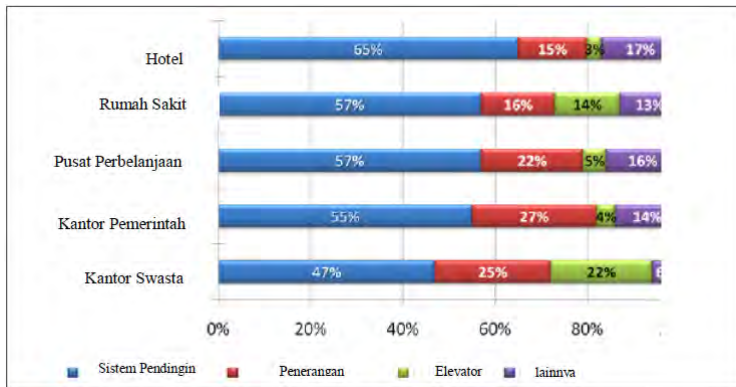
## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Konsumsi energi total sektor komersial di Indonesia masih didominasi oleh listrik yang pangsaanya mencapai 70% pada tahun 2010 [1]. Jika dibandingkan pada tahun 2000 jumlah kebutuhan energi listrik mencapai tiga kali lipat. Semakin banyak gedung-gedung pemerintah dan swasta, pusat perbelanjaan dan hotel baru dibangun akan menyebabkan kenaikan konsumsi listrik yang cukup tinggi [2].

Dari hasil survei dan audit yang dilakukan oleh Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) dan *Japan International Cooperation Agency* (JICA) pada tahun 2012 yang sebagian besar dilakukan di Jakarta, diperoleh beberapa data mengenai intensitas energi listrik di bangunan dan distribusi penggunaan listrik di bangunan komersial.

Energi listrik paling besar digunakan untuk menjalankan sistem pengkondisian udara, yang mencapai 65 % untuk hotel, rumah sakit 57 %, pusat perbelanjaan mencapai 57 %, kantor pemerintahan 55 % dan gedung perkantoran mencapai 47 %. Dari angka ini bisa dilihat bahwa potensi penghematan energi terbesar di gedung-gedung komersial adalah pada sistem pengkondisian udara [2]. Dengan menerapkan teknologi yang tepat pada sistem tersebut diharapkan dapat menekan penggunaan energi listrik disektor komersial dan di Indonesia instansi pemerintah yang menangani distribusi dan pengelolaan energi listrik adalah Perusahaan Listrik Negara (PLN).



**Gambar 1.1** Distribusi penggunaan listrik sektor komersial [2].

PLN telah menetapkan tarif tenaga listrik sesuai dengan waktu beban puncak (WBP) yakni pukul 17.00 WIB hingga 22.00 WIB dan luar waktu beban puncak (LWBP) yakni pukul 22.00 WIB hingga 17.00 WIB. Kedua bagian ini memiliki harga operasi yang berbeda. Untuk penggunaan pada WBP, PLN akan memberikan tarif yang lebih mahal dibandingkan penggunaan pada LWBP dengan faktor pengali ( $k$ ) sebesar 1.4 hingga 2 [3]. Perbedaan harga operasi PLN ini merupakan salah satu penyebab membengkaknya biaya operasional gedung pada penggunaan sistem pengkondisian udara.

Dari hasil audit yang dilakukan BPPT dan JICA menjelaskan bahwa gedung komersial seperti hotel, pusat perbelanjaan, rumah sakit, gedung perkantoran pemerintah dan swasta memiliki profil beban listrik yang berbeda [2]. Sebagian besar gedung komersial beroperasi dari pukul 07.00 WIB hingga 22.00 WIB. Karena pemakaian terbesar pada gedung komersial adalah sistem pendingin maka, salah satu teknologi yang dapat menekan beban

listrik pada sistem pendingin adalah sistem *Thermal Energy Storage* (TES).

TES merupakan sebuah teknologi yang dapat menggeser beban pendinginan gedung yang terjadi pada saat waktu beban puncak pukul 17.00 WIB hingga 22.00 WIB menjadi luar waktu beban puncak khususnya di Indonesia. Hasnain dkk [4] telah melakukan analisis penghematan penggunaan energi listrik pada bangunan kantor menggunakan TES di Saudi Arabia. Mereka menyimpulkan bahwa sistem TES dapat mengurangi beban pendinginan hingga 30-40 % dan beban listrik gedung sebesar 10-20%.

Hal yang penting dari sistem TES yaitu terdapat pada kapasitas *chiller* dan *tanki* penyimpanan atau TES *tank*. Selama proses penyimpanan (*charging period*), *chiller* akan memproduksi *chilled water* dan akan menyimpannya kedalam TES *tank*. Selama WBP, TES membantu menggantikan *chiller* untuk memenuhi beban pendinginan khususnya pada saat tarif listrik mahal [5-7]. Sehingga untuk membangun sistem TES yang efisien, dibutuhkan desain kapasitas *chiller* dan kapasitas TES *tank* yang optimal.

Perbedaan kapasitas *chiller* dan beban pendinginan sebaiknya diminimumkan. Hal ini perlu pengetahuan akan jumlah beban pendinginan gedung komersial, menentukan jumlah *chilled water* yang diproduksi oleh *chiller* dan menentukan kapasitas total *chiller* yang dibutuhkan untuk memenuhi beban pendinginan gedung komersial. Dalam perencanaan kapasitas *chiller* yang efisien dibutuhkan kapasitas total *chiller* yang cukup untuk memenuhi beban pendinginan gedung komersial.

Sistem TES *tank* akan mengurangi kapasitas total *chiller* dan rentang operasi kapasitas total *chiller* saat proses penyimpanan. Namun adanya *heat loss* pada TES *tank* harus diperhatikan sebab semakin besar dan semakin lama energi yang tersimpan pada TES *tank* akan menyebabkan semakin besar *heat loss* pada TES *tank* [8]. Dan berujung penambahan kapasitas *chiller*, biaya konsumsi listrik dan biaya investasi sistem TES akan semakin besar.

Oleh karena itu diperlukan suatu perhitungan optimasi terhadap tiga variabel tersebut yakni kapasitas total *chiller*, kapasitas penyimpanan TES *tank* dan *heat loss* pada TES *tank* untuk mencari perbedaan kapasitas total *chiller* dan beban pendinginan gedung yang minimum disertai *heat loss* pada TES *tank* yang kecil. Karena variabel yang di optimasi yaitu kapasitas total *chiller*, sistem TES *tank* dan *heat loss* pada TES *tank* bersifat *linier*. Maka variabel optimasi tersebut termasuk dalam permasalahan optimasi *linier programming*. Permasalahan optimasi *linier programming* dapat menghasilkan solusi *global optimum* dengan menggunakan metode *simplex linier programming* [9]. Dengan menggunakan metode *simplex linier programming*, diharapkan akan didapatkan nilai perbedaan kapasitas *chiller* dan beban pendinginan yang minimum disertai *heat loss* pada TES *tank* yang kecil dengan mencari biaya penghematan konsumsi listrik, nilai *payback period* dan nilai *return on investment* yang optimal. Pada dasarnya optimasi pada sistem TES digunakan untuk membantu operator menggunakan sistem TES secara efektif dan efisien dengan energi atau biaya yang sedikit [10].

## 1.2 Rumusan Permasalahan

Dalam uraian latar belakang, maka dapat dirumuskan permasalahan dalam tugas akhir ini, yaitu:

- a. Bagaimana mendapatkan nilai kapasitas *chiller* dan TES *tank* setiap gedung komersial yang optimal.
- b. Bagaimana pengaruh variasi beban pendinginan setiap gedung komersial dan kombinasi beban pendinginan antar gedung komersial terhadap kapasitas *chiller* dan TES *tank* dengan mempertimbangkan biaya penghematan listrik, *payback period* dan *return on investment*.

### 1.3 Ruang Lingkup Penelitian

Adapun ruang lingkup penelitian dalam penelitian tugas akhir ini, antara lain:

- a. Gedung komersial yang digunakan adalah kantor pemerintah, kantor swasta, pusat perbelanjaan, hotel dan rumah sakit.
- b. Profil Beban listrik gedung komersial yang digunakan mengikuti penelitian Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) dan *Japan International Cooperation Agency* (JICA) tahun 2012.
- c. Sistem TES *tank* bekerja dengan Energi yang hilang relatif kecil.

- d. Metode optimasi yang digunakan adalah metode *simplex linier programming*.
- e. Standard perhitungan menganut standar Green Building Council Indonesia (GBCI), Standard Nasional Indonesia (SNI) dan ASHRAE.

#### **1.4 Tujuan**

Tujuan dari tugas akhir ini adalah:

- a. Untuk mendapatkan nilai kapasitas *chiller* dan TES *tank* setiap gedung dan kombinasi antar gedung komersial yang optimal.
- b. Untuk mengetahui pengaruh variasi beban pendinginan setiap gedung komersial dan kombinasi beban pendinginan antar gedung komersial terhadap kapasitas *chiller* dan TES *tank* dengan mempertimbangkan biaya penghematan listrik, *payback period* dan *return on investment*.

#### **1.5 Manfaat**

Melalui tugas akhir ini akan diperoleh nilai kapasitas *chiller* dan TES *tank* yang optimal untuk memenuhi kebutuhan beban pendinginan setiap gedung. Serta mampu mendapatkan biaya penghematan listrik, *payback period* yang singkat dan *return on investment* yang optimal





“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Sektor Komersial**

Sektor komersial adalah sektor yang terdiri dari perusahaan yang tidak terlibat pada transportasi atau industri pengolahan atau manufaktur dan aktivitas industri lainnya seperti pertanian, pertambangan atau konstruksi. Usaha komersial meliputi hotel, motel, restoran, penjualan besar seperti supermarket, penjualan ritel. Institusi pendidikan, sosial dan kesehatan, kantor swasta dan kantor pemerintahan serta pelayanan publik lainnya apabila perusahaan yang mengoperasikannya dianggap komersial [2].

Sektor komersial dibedakan menjadi dua, pemerintah dan swasta. Pemerintah meliputi kantor-kantor pemerintah daerah dan pemerintah pusat, sisanya seperti kantor swasta, hotel, pusat perbelanjaan dan rumah sakit dimasukkan kedalam sektor swasta. Sebagian besar penggunaan energi sektor komersial berhubungan dengan bangunan dan peralatan yang bekerja didalamnya. Energi listrik yang dibutuhkan pada bangunan sektor komersial digunakan untuk penerangan, pendingin ruangan, lift, pompa dan peralatan kantor seperti komputer dan lainnya [2].

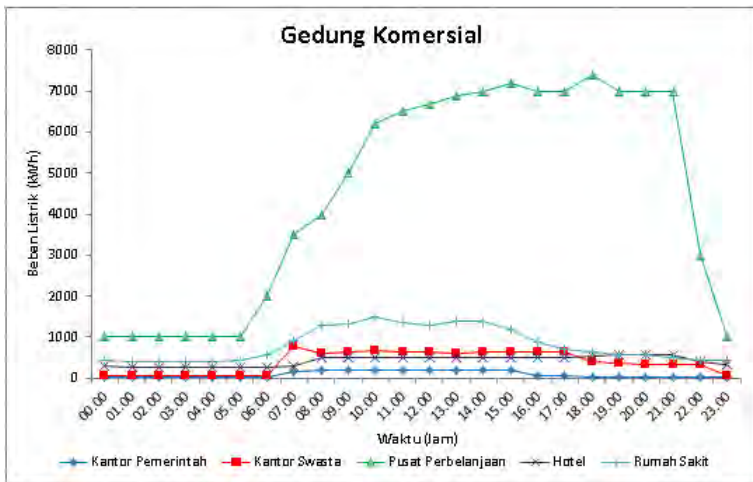
#### **2.2 Profil Beban Listrik Gedung Komersial**

BPPT dan JICA tahun 2012 telah melakukan penelitian profil penggunaan beban listrik gedung-gedung komersial yang terletak sebagian besar di Jakarta [2]. Berikut data profil beban listrik gedung komersial yang ditunjukkan pada Tabel 2.1 berikut ini:

**Tabel 2.1** Data profil beban listrik gedung komersial terhadap waktu [2].

Waktu	Beban Listrik Gedung Komersial (kW)				
	Rumah sakit	Hotel	Pusat Perbelanjaan	Kantor Pemerintah	Kantor Swasta
0	420	300	1020	20	50
1	410	280	1010	20	50
2	395	250	1000	20	50
3	390	265	1000	20	50
4	400	250	1000	20	50
5	420	250	1000	20	50
6	585	250	2000	25	60
7	900	285	3500	160	780
8	1285	495	4000	185	620
9	1315	510	5000	198	625
10	1500	520	6200	200	670
11	1350	510	6500	200	650
12	1300	510	6700	210	655
13	1380	510	6900	210	605
14	1375	510	7000	205	640
15	1200	510	7200	205	642
16	880	510	7000	60	635
17	700	515	7000	55	625
18	650	525	7400	40	385
19	580	575	7000	20	365
20	565	580	7000	15	350
21	495	575	7000	15	350
22	450	400	3000	15	350
23	425	320	1000	15	50

Pada Tabel 2.1 beban listrik gedung-gedung komersial di gambarkan dalam bentuk kurva yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 dibawah ini:



**Gambar 2.1** Profil beban listrik gedung komersial terhadap waktu.

Profil beban listrik gedung komersial terhadap waktu Gambar 2.1 menunjukkan gedung pusat perbelanjaan memiliki beban listrik yang paling besar. Gedung pusat perbelanjaan mulai beroperasi pukul 09.30 WIB hingga 21.00 WIB. Utilitas utama seperti sistem pengkondisian udara dan penerangan umumnya mulai beroperasi secara bertahap mulai pukul 07.00 sehingga beban listrik mulai naik hingga pukul 22.00 WIB. Posisi penggunaan beban listrik terbesar kedua yakni rumah sakit. Rumah sakit memiliki jam operasional selama 24 jam dengan operasional yang berbeda tiap instalasi. Untuk peralatan seperti AC, peralatan medis dan peralatan kantor, umumnya dioperasikan pada jam kerja yakni pukul 06.00 WIB dan berhenti dinyalakan pukul 17.00 WIB. Kecuali instalasi yang membutuhkan waktu operasional selama 24 jam seperti UGD dan farmasi klinik.

Sama seperti rumah sakit, gedung hotel memiliki waktu operasional selama 24 jam, beban listrik hotel meningkat pada pukul 07.00 WIB sebab operasional hotel mulai dari reservasi dan pendinginan ruangan selain hunian, karena AC beroperasi selama 24 jam di setiap hunian. Untuk kantor pemerintah dan kantor

swasta beroperasi selama 5 hari sepekan dengan durasi selama 8-9 jam perhari. Waktu operasional kantor dimulai pukul 07.00 WIB untuk memulai pendinginan ruangan dan peralatan kantor lainnya, hingga pukul 17.00 WIB. Untuk kantor swasta terdapat pekerjaan tambahan sehingga pemakaian listrik hingga pukul 22.00 WIB.

### 2.3 Tarif Tenaga Listrik Sektor Komersial

Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Republik Indonesia melalui Perusahaan Listrik Negara (PLN) telah menetapkan tarif tenaga listrik sesuai dengan golongan tarif. Untuk rumah sakit termasuk dalam golongan pelayanan umum, dan untuk hotel dan pusat perbelanjaan dan kantor swasta termasuk dalam golongan tarif bisnis sedangkan untuk kantor pemerintahan masuk dalam golongan tarif kantor pemerintahan dan penerangan umum.

**Tabel 2.2** Tarif tenaga listrik

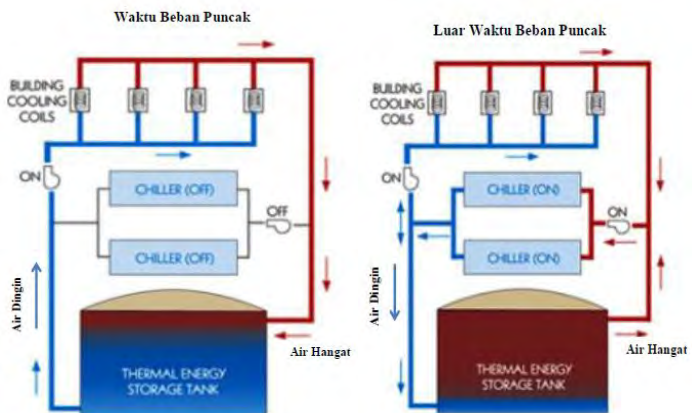
Beban	Gedung	Kondisi	Pengali	Harga/kWh
di atas 200 kVA	Rumah Sakit	WBP	$\text{p} \times \text{k} \times 1170$	Rp 1976
		LWBP	1170	Rp 1170
	Kantor Swasta	WBP	$\text{k} \times 1020$	Rp 2040
		LWBP	1020	Rp 1020
	Hotel dan Pusat Perbelanjaan	WBP	$\text{k} \times 1020$	Rp 2040
		LWBP	1020	Rp 1020
	Kantor Pemerintah	WBP	$\text{k} \times 947$	Rp 1894
		LWBP	947	Rp 947

\*faktor pengali untuk nilai  $\text{k}$  sebesar 2 dan nilai  $\text{p}$  sebesar 1.3

Pada Tabel 2.2 menunjukkan tarif tenaga listrik setiap golongan dan waktu pemakaian WBP dan LWBP. Perbedaan tarif listrik saat kondisi WBP dan LWBP mengikuti faktor pengali ( $\text{k}$ ) sebesar  $(1.4 \leq \text{k} \leq 2)$ , sedangkan untuk faktor pengali ( $\text{p}$ ) merupakan faktor pengali untuk golongan pelayanan umum yang bersifat komersial, nilainya sebesar 1.3. kedua nilai ini ditetapkan oleh Direktur PT Perusahaan Listrik Negara (PLN) [3].

## 2.4 Thermal Energy Storage

*Thermal energy storage* (TES) merupakan metode yang digunakan untuk memproduksi dan menyimpan pendinginan pada saat tarif listrik murah atau LWBP dan pendinginan ini digunakan untuk memenuhi beban pendinginan pada saat tarif listrik mahal atau WBP [7,11,12]. Seperti Gambar 2.2 konsep dari TES ini sangat sederhana yakni air yang didinginkan oleh *chiller* pada saat LWBP disimpan dalam TES *tank* yang terisolasi. Penyimpanan *chilled water* ini akan digunakan untuk memenuhi beban pendinginan pada saat WBP, dengan menggunakan pompa sirkulasi serta peralatan energi lainnya.



**Gambar 2.2** Skema sistem *thermal energy storage* [13].

Beberapa keuntungan dari *Thermal energy storage* [7] ini adalah sebagai berikut:

### 2.4.1 Penggeseran Beban

Pada sistem pengkondisian udara konvensional, *chiller* bekerja penuh untuk memenuhi kebutuhan beban pendinginan gedung selama waktu operasi gedung. Dengan menggunakan TES, *chiller* bekerja saat tarif listrik murah atau LWBP dan saat WBP, *chiller* dalam kondisi *off operation*.

### 2.4.2 Biaya Perkapita Berkurang

Dengan operasi *chiller* saat LWBP atau saat tarif listrik murah, maka biaya beban listrik perkapita akan berkurang.

### 2.4.3 Operasi yang efisien

Kapasitas *chiller* ditentukan sesuai kebutuhan pendinginan puncak suatu gedung. Sistem *chiller* akan sangat menguntungkan bila dioperasikan pada titik eflisiensi tertinggi dalam rentang tarif listrik murah atau WBP.

## 2.5 Perhitungan Konsumsi Energi TES

Secara umum peralatan yang menunjang dalam sistem TES terbagi menjadi dua yakni TES *tank* dan *chiller plant*. Kedua variabel ini memiliki perhitungan energi yang berbeda untuk perhitungan konsumsi energi *chiller plant* menggunakan standard ASHRAE dan GBCI. *Chiller plant* merupakan serangkaian peralatan yang membantu kerja *chiller* dalam distribusi *chilled water* menuju AHU serta membantu dalam distribusi *chilled water* yang telah disimpan selama proses *charging* menuju AHU saat WBP.

*Chiller plant* terdiri dari *chiller*, *chilled water pump*, *condenser water pump*, dan *cooling tower*. *Chiller* adalah mesin pendingin yang berfungsi untuk mendinginkan air yang menggunakan *refrigerant* kemudian digunakan untuk mendinginkan udara di dalam gedung. *Chilled water pump* atau CHWP merupakan pompa yang berfungsi untuk sirkulasi *chilled water* antara *air handling unit* (AHU), *chiller* dan TES. *Condenser water pump* atau CWP merupakan pompa yang berfungsi dalam mengalirkan fluida antara *cooling tower* dan *chiller*. *Cooling tower* atau CT merupakan media pendingin yang berfungsi untuk mendinginkan *refrigerant* di dalam *chiller*. Besarnya daya CT sendiri berdasarkan spesifikasi *cooling tower* yang digunakan.

Hal yang utama dalam sistem TES *tank* adalah menghitung kapasitas TES *tank* yang sesuai dengan kebutuhan. Pada sistem ini volume TES *tank* bergantung pada perbedaan temperatur

antara air yang disuplai dari TES *tank* menuju AHU dan air yang kembali dari AHU menuju TES *tank* [14]. Perhitungan kapasitas TES *tank* ditunjukkan pada Persamaan berikut:

$$Q = m c_p (T_m - T_s) \quad (2.1)$$

dengan

$Q$  adalah jumlah kalor yang disimpan di dalam TES *tank*.

$m$  adalah jumlah massa air yang disimpan di dalam TES *tank*.

$c_p$  adalah panas spesifik air.

$T_m$  adalah temperatur maksimum *chilled water* dari AHU

$T_s$  adalah temperatur *chilled water* dari *chiller* yang masuk ke TES *tank*.

Perhitungan volume tanki [14] menggunakan Persamaan berikut ini:

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (2.2)$$

dengan:

$V$  adalah volume TES *tank* (m<sup>3</sup>)

$m$  adalah jumlah massa air (kg)

$\rho$  adalah massa jenis air (kg/m<sup>3</sup>)

Perhitungan daya CHWP [5] ditunjukkan pada Persamaan sebagai berikut:

$$CHWP = \frac{CHWFR \times Pump\ Head}{a \times Pump\ Eff} \quad (2.3)$$

dengan:

$CHWP$  adalah daya *chilled water pump* (kW)

$CWFR$  adalah laju aliran *chilled water* (GPM)

$Pump\ Head$  adalah tinggi tekanan pompa maksimal (ft)

$a$  adalah konstanta dengan nilai 3960



*Pump Eff* adalah efisiensi pompa

Perhitungan CHWFR [5] ditunjukkan pada Persamaan berikut ini.

$$CHWFR = \frac{a \times Q_{tot}}{\Delta T \text{ Chilled Water}} \quad (2.4)$$

dengan:

$a$  adalah konstanta dengan nilai 24

$\Delta T$  adalah perbedaan suhu antara air yang di dinginkan *chiller* dengan air dari AHU (°F)

Setelah perhitungan daya CHWP, dapat dilakukan perhitungan daya CWP [5] dengan menggunakan Persamaan sebagai berikut.

$$CWP = \frac{CWFR \times \text{Pump Head}}{a \times \text{Pump Eff}} \quad (2.5)$$

dengan:

*CWP* adalah daya *condenser water pump* (kW)

*CWFR* adalah laju aliran air kondenser (GPM)

*Pump Head* adalah tinggi tekanan pompa maksimal (ft)

$a$  adalah konstanta dengan nilai 3960

*Pump Eff* adalah efisiensi pompa

Perhitungan CHWFR [5] ditunjukkan pada Persamaan berikut ini.

$$CWFR = \frac{a \times Q_{tot}}{\Delta T \text{ Condenser Water}} \quad (2.6)$$

dengan:

$a$  adalah konstanta dengan nilai 30

$\Delta T$  adalah perbedaan suhu antara air yang didinginkan *chiller* dengan air dari *cooling tower* (°F)

Perhitungan konsumsi energi *chiller plant* [5]. Ditunjukkan pada Persamaan berikut:

$$\text{Konsumsi Chiller} = Q_{tot} \times t_{op} \times (NPLV \times CHWP \times CWP \times CT) \quad (2.7)$$

dengan

$Q_{tot}$  adalah jumlah *chilled water* yang diproduksi oleh *chiller*.

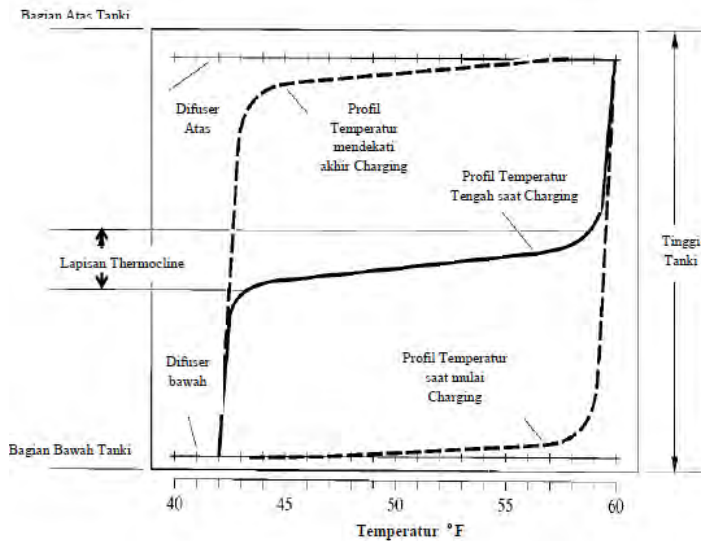
$t_{op}$  adalah waktu untuk memproduksi *chilled water*.

$Q_{tot}$  pada konsumsi *chiller* gedung tanpa TES adalah jumlah *chilled water* yang diproduksi oleh *chiller* untuk memenuhi beban pendinginan gedung setiap jam. Untuk  $Q_{tot}$  pada konsumsi *chiller* gedung menggunakan TES adalah jumlah *chilled water* yang diproduksi oleh *chiller* untuk memenuhi beban pendinginan dan TES *tank*. NPLV merupakan karakteristik sistem pendingin ketika beroperasi pada berbagai kapasitas pendinginan. Besarnya nilai NPLV pada gedung menggunakan standar ASHRAE.

## 2.6 Penurunan Temperatur dan Heat loss pada TES tank

Profil temperatur yang terbentuk selama proses *charging* ataupun *discharging* pada TES *tank* memiliki interval yang bervariasi setiap waktu. Profil temperatur dapat diilustrasikan dalam diagram *height-temperature* H-T pada saat permulaan, pertengahan, dan mendekati akhir proses *charging*, seperti ditunjukkan Gambar 2.3. Pada pertengahan proses *charging*, *chilled water* dibagi atas tiga daerah, yaitu daerah bawah adalah air yang lebih dingin dan lebih berat, *thermocline* dan daerah atas adalah air yang lebih hangat dan lebih ringan.

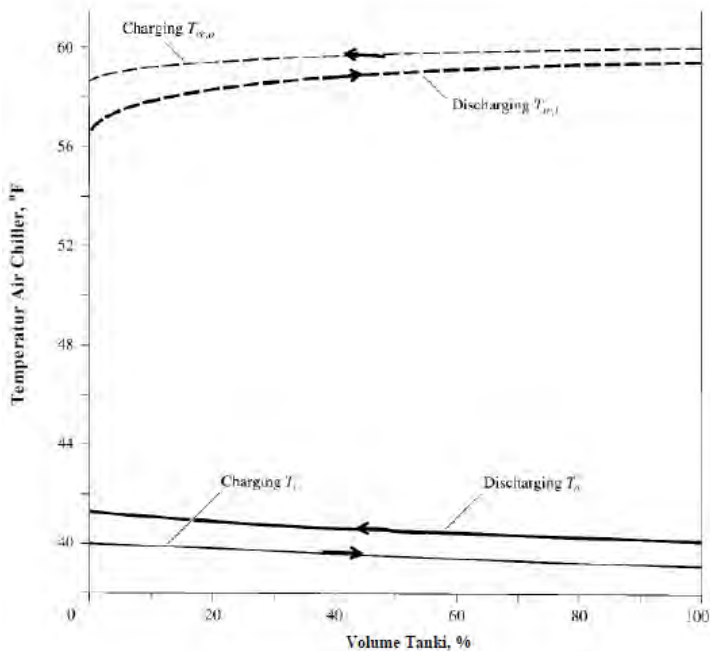
*Thermocline* adalah daerah dimana terdapat perbedaan temperatur yang terlalu tajam. Temperatur air bervariasi antara 12°C sampai 15°C. *Thermocline* memisahkan antara *chilled water* yang lebih dingin dengan *chilled water* yang lebih hangat. Semakin tipis daerah *thermocline*, maka semakin kecil pula kerugian akibat pencampuran [14].



**Gambar 2.3** Profil temperatur dan *thermocline* pada TES tank [14].

Untuk seluruh proses *charging* dan *discharging*, nilai  $T_o$  selama *discharging* selalu lebih besar dari pada nilai rata-rata  $T_i$ , karena adanya kerugian akibat pencampuran dan penyerapan panas, dengan aliran air konstant [15]. Profil temperatur pada TES tank dipengaruhi oleh jumlah laju aliran yang masuk kedalam tanki dan juga konveksi alami pada dinding tanki yang disebabkan oleh lingkungan [8].

Gambar 2.3 menunjukkan kurva temperatur *chilled water* dengan volume tangki selama proses *charging* dan *discharging*. Temperatur masuk dan keluar diukur pada bagian awal difuser atas dan bawah. Temperatur masuk *chilled water* ke dalam TES tank berkurang secara gradual bersamaan dengan bertambahnya volume *chilled water* dalam TES tank. Hal ini dikarenakan nilai pertukaran kalor terlalu besar terhadap air yang masuk dari air yang lebih hangat disekitarnya serta dapat disebabkan oleh *heat loss* perpipaan dan dinding TES tank pada awal proses *charging* [14].



**Gambar 2.4** Kurva temperatur *chilled water* terhadap volume TES tank selama proses *charging* dan *discharging* [14].

Selama proses *discharging*, *chilled water* di dalam TES tank keluar dari TES tank dan disuplai ke *cooling coils* pada AHU dan terminal sedangkan *chilled water* yang kembali masuk ke TES tank melalui *diffuser* atas. Temperatur *chilled water* yang keluar dari TES tank ( $T_o$ ) bertambah secara gradual bersamaan dengan berkurangnya volume *chilled water* dalam TES tank. Karena *chilled water* didalam TES tank memiliki perbedaan temperatur pada *Thermocline*. ( $T_o$ ) secara gradual bertambah selama proses *discharging* [14].

Penurunan temperatur pada TES tank juga dipengaruhi oleh volume serta rasio ketinggian dan diameter dari TES tank. Untuk penyimpanan yang memerlukan waktu yang lama atau 24 jam, tanki dengan nilai rasio ketinggian dan diameter sebesar 5, dapat

memberikan *heat loss* yang rendah, begitu juga sebaliknya. Untuk penyimpanan dengan periode singkat kurang dari 12 jam, sebaiknya menggunakan nilai rasio ketinggian dan diameter sebesar 1, dapat memberikan *heat loss* yang rendah [8].

## 2.7 Perhitungan Biaya Investasi

Analisis biaya investasi sistem TES dilakukan dengan melakukan perhitungan besarnya biaya investasi sistem pendingin konvensional dan sistem pendingin menggunakan TES. Sistem pendingin konvensional merupakan sistem pendingin yang diterapkan di gedung komersial. Secara umum perhitungan biaya investasi sistem pendingin konvensional pada gedung komersial ditunjukkan pada perhitungan berikut ini.

$$C_{Konvensional} = C_{Chiller} + C_{CHWP} + C_{CWP} + C_{CT} + C_{operasional} \quad (2.8)$$

dengan:

$C_{Konvensional}$	adalah biaya investasi TES (Rp)
$C_{Chiller}$	adalah biaya investasi <i>Chiller</i> (Rp)
$C_{CHWP}$	adalah biaya investasi Pompa CHWP (Rp)
$C_{CWP}$	adalah biaya investasi Pompa CWP (Rp)
$C_{CT}$	adalah biaya investasi Cooling tower (Rp)
$C_{Operasional}$	adalah biaya operasional listrik sistem pendingin konvensional (Rp)

Sedangkan perhitungan biaya investasi sistem pendingin menggunakan TES ditunjukkan pada perhitungan berikut ini.

$$C_{TES} = C_{Chiller} + C_{CHWP} + C_{CWP} + C_{TES \text{ tank}} + C_{CT} + C_{operasional} \quad (2.9)$$

dengan:

$C_{TES}$	adalah biaya investasi TES (Rp)
$C_{Chiller}$	adalah biaya investasi <i>Chiller</i> (Rp)
$C_{CHWP}$	adalah biaya investasi Pompa CHWP (Rp)
$C_{CWP}$	adalah biaya investasi Pompa CWP (Rp)
$C_{TES \text{ tank}}$	adalah biaya investasi TES <i>tank</i> (Rp)

$C_{CT}$  adalah biaya investasi Cooling tower (Rp)  
 $C_{Operasional}$  adalah biaya operasional listrik sistem pendingin menggunakan TES (Rp)

Dalam analisis investasi terdapat berbagai metode yang dapat digunakan, salah satu metode untuk analisis investasi adalah *payback period* dan *return on investment* (ROI). *Payback period* adalah perbandingan antara investasi awal dengan penghematan yang dicapai dari menggunakan suatu alat tertentu. Dengan kata lain, *payback period* adalah waktu yang diperlukan untuk menghemat uang sebesar nilai alat. Berikut Persamaan *payback period* (tahun) [16].

$$\text{payback period} = \frac{\text{Biaya Investasi}}{\text{Biaya Penghematan}} \quad (2.9)$$

*Return on investment* adalah total keuntungan maksimal dalam usia ekonomis suatu alat dibandingkan dengan investasi awal. Adapun Persamaan perhitungan *return on investment* (ROI) [16] ditunjukkan pada Persamaan (2.10) berikut ini.

$$ROI = \frac{\text{Biaya Penghematan}}{\text{Biaya Investasi Awal}} \times 100\% \quad (2.10)$$

## 2.8 Metode Simplex Linier Programming

Metode simplex linier programming adalah metode yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan optimasi pada variabel yang mengandung Persamaan matematis orde pertama. Persamaan matematis orde pertama meliputi 4 operasi dasar yakni penambahan, pengurangan, perkalian dan pembagi. Simplex LP merupakan digunakan untuk optimasi *linier programming* dengan fungsi objektif dan fungsi batas merupakan fungsi linier.

Metode simplex linier programming akan memberikan *globally optimal solution*, solusi yang paling baik untuk memenuhi seluruh fungsi batas permasalahan optimasi yang diberikan. Simplex LP akan menemukan *optimal solution* untuk

*linier programming* dengan dua atau lebih fungsi batas yang diberikan [9].

Metode simplex LP dapat dioperasikan menggunakan Excel Solver. Dalam Excel solver terdapat 3 metode penyelesaian untuk permasalahan optimasi yakni: simplex LP, *Generailized Reduced Gradient* (GRG) *nonlinier* dan *Evolutionary*. Ketiga metode tersebut memiliki karakteristik yang berbeda. Untuk GRG nonlinier merupakan metode penyelesaian untuk *nonlinier programming* dan *smooth function*. Metode GRG *nonlinier* dapat pula digunakan dalam menyelesaikan optimasi *linier programming*. Tetapi kekurangan dari metode ini adalah hasil optimasi memiliki efisiensi yang rendah dibanding dengan metode simplex LP [9].

Untuk metode *evolutionary* merupakan metode penyelesaian permasalahan optimasi dengan fungsi tujuan dan fungsi batas yang tidak kontinu (*discontinuous function*) dan *non-smooth function*. Permasalahan optimasi yang menggunakan metode *evolutionary* adalah permasalahan *Travelling Salesman Program* (TSP) dengan penentuan jarak minimum untuk distribusi barang dengan banyak tujuan yang berbeda.

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Objek Penelitian

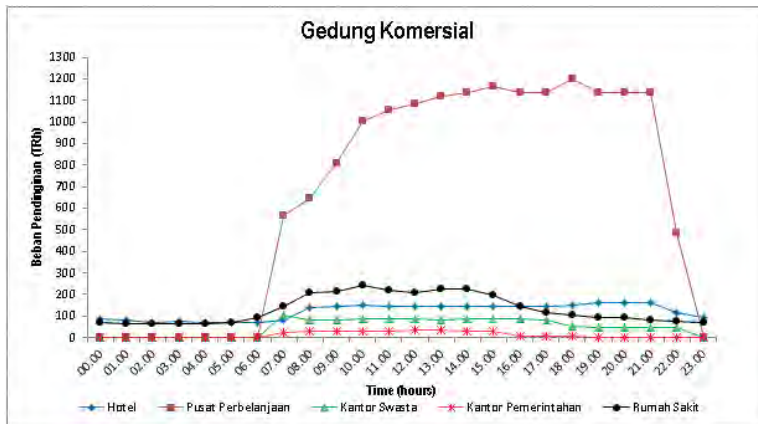
Model beban pendinginan gedung komersial dihitung sesuai dengan profil penggunaan sistem pendingin gedung dan waktu operasional sistem pendingin gedung komersial. Variasi beban pendinginan setiap waktu akan mempengaruhi kerja *chiller* dan kapasitas penyimpan TES *tank*. Model beban pendinginan gedung komersial ditunjukkan pada Tabel 3.1 sebagai berikut:

**Tabel 3.1** Beban pendinginan gedung komersial.

Waktu	Beban Pendinginan Gedung Komersial (TR)				
	Pusat Perbelanjaan	Rumah sakit	Hotel	Kantor swasta	Kantor pemerintah
0	0	68	85	0	0
1	0	66	80	0	0
2	0	64	71	0	0
3	0	63	75	0	0
4	0	65	71	0	0
5	0	68	71	0	0
6	0	95	71	0	0
7	567	146	81	104	25
8	648	208	141	83	29
9	810	213	145	84	31
10	1005	243	148	90	31
11	1053	219	145	87	31
12	1086	211	145	88	33
13	1118	224	145	81	33
14	1134	223	145	86	32
15	1167	194	145	86	32
16	1134	143	145	85	9
17	1134	113	146	84	9
18	1199	105	149	51	6
19	1134	94	163	49	0
20	1134	92	165	47	0
21	1134	80	163	47	0
22	486	73	114	47	0
23	0	69	91	0	0



Pada Tabel 3.1, dibuat grafik profil beban pendinginan terhadap waktu yang ditunjukkan pada Gambar 3.1 berikut ini:



**Gambar 3.1** Profil beban pendinginan gedung komersial terhadap waktu.

Profil beban pendinginan gedung terhadap waktu Gambar 3.1 menunjukkan gedung pusat perbelanjaan memiliki beban pendinginan terbesar diantara gedung-gedung komersial lainnya. Waktu operasi gedung pusat perbelanjaan dimulai pada pukul 06.00 WIB hingga pukul 22.00 WIB. Dan beban pendinginan puncak pusat perbelanjaan berada pada pukul 18.00 WIB sebesar 1199 TR. Rumah sakit memiliki operasional selama 24 jam, sehingga sistem pendinginan gedung beroperasi selama rentang waktu tersebut. Beban pendinginan puncak pada rumah sakit berada pada pukul 10.00 WIB sebesar 243 TR.

Hotel memiliki waktu operasi selama 24 jam, dengan beban puncak terjadi pada pukul 18.00 WIB sebesar 149 TR. Kantor swasta memiliki beban puncak mulai pukul 07.00 WIB sebesar 104 TR dan kantor pemerintahan memiliki beban pendinginan puncak pada pukul 13.00 WIB sebesar 33 TR.

**Tabel 3.2** Beban pendinginan kombinasi gedung.

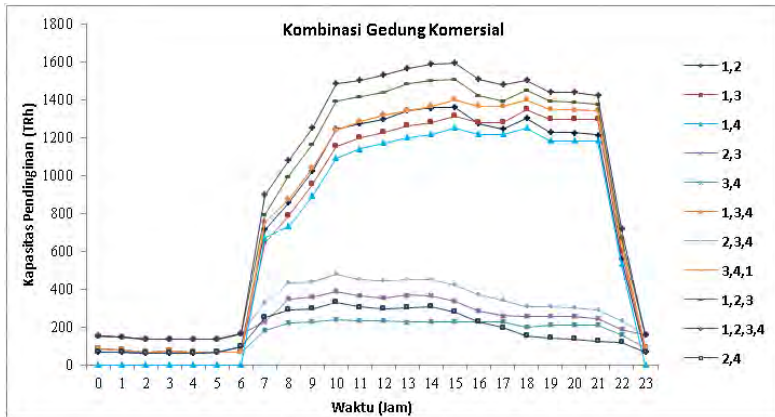
Waktu	Kombinasi Beban Pendinginan (TR)										
	1,2	1,3	1,4	2,3	2,4	3,4	1,3,4	2,3,4	1,2,4	1,2,3	1,2,3,4
0	68	85	0	153	68	85	85	153	68	153	153
1	66	80	0	146	66	80	80	146	66	146	146
2	64	71	0	135	64	71	71	135	64	135	135
3	63	75	0	139	63	75	75	139	63	139	139
4	65	71	0	136	65	71	71	136	65	136	136
5	68	71	0	139	68	71	71	139	68	139	139
6	95	71	0	166	95	71	71	166	95	166	166
7	713	648	671	227	250	185	753	331	817	794	898
8	857	789	731	349	291	224	872	432	939	997	1080
9	1023	955	894	358	297	229	1039	442	1107	1168	1252
10	1248	1153	1094	391	333	237	1242	480	1337	1396	1485
11	1272	1198	1140	364	306	232	1285	451	1359	1417	1504
12	1297	1231	1173	356	298	233	1318	443	1384	1442	1529
13	1342	1263	1199	369	305	226	1344	450	1423	1487	1568
14	1357	1280	1220	368	308	231	1365	453	1443	1502	1588
15	1361	1312	1253	339	280	231	1398	425	1447	1506	1592
16	1277	1280	1219	288	227	230	1364	372	1362	1422	1507
17	1248	1281	1218	260	197	230	1364	343	1331	1394	1478
18	1305	1349	1251	255	157	201	1400	306	1356	1454	1505
19	1228	1298	1183	257	143	212	1347	306	1277	1392	1441
20	1226	1299	1181	256	138	212	1346	303	1273	1391	1438
21	1215	1298	1181	244	127	210	1345	290	1261	1378	1425
22	559	600	533	187	120	161	647	233	606	673	720
23	69	91	0	160	69	91	91	160	69	160	160

Keterangan:

- 1,2 adalah kombinasi pusat perbelanjaan dan rumah sakit.
- 1,3 adalah kombinasi pusat perbelanjaan dan hotel.
- 1,4 adalah kombinasi pusat perbelanjaan dan kantor swasta.
- 2,3 adalah kombinasi rumah sakit dan hotel.
- 2,4 adalah kombinasi rumah sakit dan kantor swasta.
- 3,4 adalah kombinasi hotel dan kantor swasta.
- 1,3,4 adalah kombinasi pusat perbelanjaan, hotel dan kantor swasta.
- 2,3,4 adalah kombinasi rumah sakit, hotel dan kantor swasta.
- 3,4,1 adalah kombinasi hotel, kantor swasta dan pusat perbelanjaan.
- 1,2,3 adalah kombinasi pusat perbelanjaan, rumah sakit dan hotel.
- 1,2,3,4 adalah kombinasi pusat perbelanjaan, rumah sakit, hotel dan kantor swasta.

Pada penelitian ini, kombinasi gedung komersial dibagi menjadi 11 kombinasi gedung sesuai dengan Tabel 3.2. Pada kombinasi beban pendinginan gedung komersial, kantor pemerintah tidak dimasukkan dalam kombinasi antar gedung komersial karena memiliki beban pendinginan yang kecil. Tujuan dari kombinasi beban pendinginan antar gedung komersial adalah untuk mengetahui pengaruh kombinasi beban pendinginan terhadap biaya penghematan listrik serta biaya investasi sistem TES.

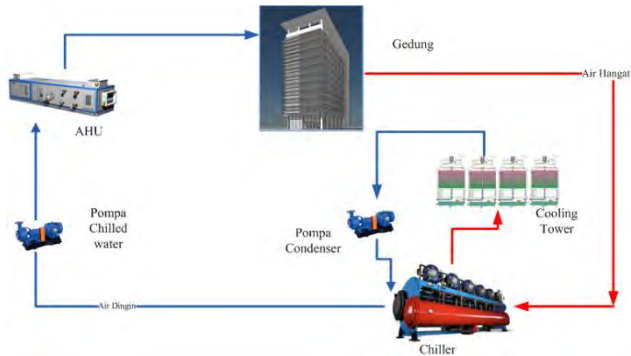
Dari data Tabel 3.2 dibuat grafik hubungan beban pendinginan kombinasi gedung terhadap waktu yang ditunjukkan pada Gambar 3.2 berikut ini:



**Gambar 3.2** Profil beban pendinginan kombinasi gedung terhadap waktu.

### 3.2 Sistem Pendingin Konvensional Gedung Komersial

Sistem pendingin konvensional atau sistem pendingin terpusat yang ditunjukkan pada Gambar 3.3 merupakan sistem pendingin yang banyak diterapkan di gedung-gedung komersial di Indonesia [2]. Sistem pendingin konvensional mengoperasikan *chiller* selama rentang waktu operasi gedung untuk memenuhi beban pendinginan gedung setiap jam. Siklus sistem pendinginan dimulai dari *chiller* memproduksi *chilled water* dan di distribusikan oleh AHU untuk memenuhi beban pendinginan gedung dan didistribusikan kembali dari AHU menuju *chiller* untuk proses pendinginan kembali. Rentang waktu operasi sistem pendinginan konvensional tidak memperhatikan kondisi WBP dan LWBP.

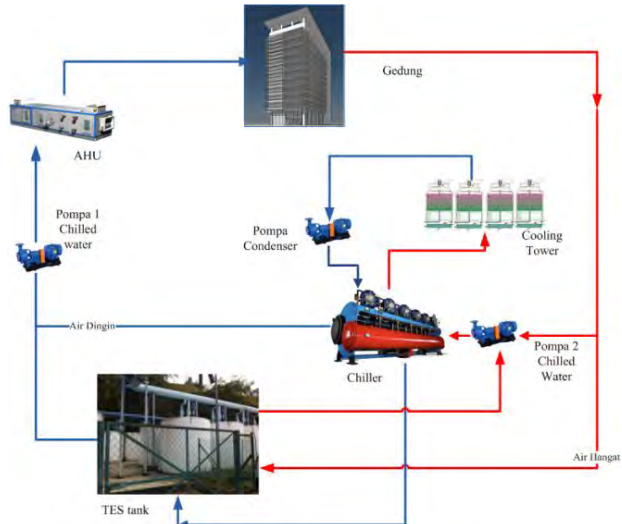


**Gambar 3.3** Sistem pendingin konvensional

### 3.3 Sistem Pendingin Menggunakan TES Gedung Komersial

Pada dasarnya prinsip kerja dari sistem pendingin menggunakan TES tidak jauh berbeda dengan sistem pendingin konvensional. Namun pada sistem pendingin menggunakan TES terdapat tanki isolator (TES *tank*) yang berfungsi menyimpan *chilled water* yang diproduksi oleh *chiller*. Pada sistem pendinginan menggunakan TES terdapat 2 proses, yakni proses *charging* dan *discharging*. *Charging* adalah proses pengisian TES *tank* oleh *chilled water* dari *chiller* pada temperatur antara 4 °C sampai 5 °C. Sedangkan *chilled water* yang kembali dari AHU pada temperatur antara 12°C sampai 15°C akan di distribusikan dari TES *tank* dan di pompa ke *chiller* untuk didinginkan kembali. Proses *charging* dilakukan pada saat tarif listrik murah atau kondisi LWBP.

*Discharging* adalah proses pengeluaran *chilled water* pada temperatur antara 4°C sampai 5°C dari TES *tank* ke AHU. Pada saat yang sama *chilled water* yang kembali dari AHU di pompa untuk mengisi TES *tank*. Proses *discharging* dilakukan saat tarif listrik mahal atau kondisi WBP.



**Gambar 3.4** Skema sistem pendingin menggunakan TES.

### 3.4 Optimasi

Pada saat proses *charging*, *chiller* memproduksi *chilled water* untuk memenuhi beban pendinginan gedung saat kondisi WBP dan LWBP. Rentang waktu *chiller* memproduksi *chilled water* adalah kondisi LWBP atau tarif listrik murah. Dan pada saat kondisi tersebut *chiller* akan menyimpan *chilled water* kedalam TES *tank*, untuk memenuhi beban pendinginan saat WBP atau tarif listrik mahal.

Sistem TES *tank* akan mengurangi kapasitas total *chiller* dan rentang waktu operasi *chiller*. Namun adanya *heat loss* pada TES *tank* harus diperhatikan sebab semakin besar *heat loss* pada TES *tank* akan mengakibatkan semakin besar kapasitas total dan berujung pada biaya investasi *chiller plant* semakin besar.

Tujuan dari optimasi adalah perbedaan kapasitas total *chiller* dan beban pendinginan di minimumkan dengan heat loss pada TES *tank* yang cukup kecil sesuai dengan Persamaan berikut  $t: 1,2 \dots 24$  jam.

$$J_{\min} = \sum_{t=1}^{24} ((X(t) - B(t) + y(t))) \quad (3.1)$$

dengan :

$X(t)$  adalah jumlah *chilled water* produksi *chiller* atau kapasitas *chiller* (TR)

$B(t)$  adalah beban pendinginan (TR)

$y(t)$  adalah *heat loss* pada TES tank (TR)

$X(t) - B(t)$  dan *heat loss*  $y(t)$  pada TES tank dibuat sekecil mungkin untuk meningkatkan efisiensi *chiller* dan TES tank. Pada penelitian ini menggunakan asumsi operasi TES tank adalah *adiabatic* dan memiliki *heat loss* yang kecil. *Heat loss* pada TES tank dipengaruhi oleh konveksi alami dan jumlah aliran massa yang masuk kedalam TES tank [8]. Carles Civit dkk [17] memperkirakan *heat loss* pada TES tank sebesar 1-2 % dari kapasitas penyimpanan setiap jam. A Kassim dkk [6,18] menjelaskan bahwa *Thermal loss* pada sistem TES diperkirakan sebesar 1 % dari proses penyimpanan. Sehingga kami memperkirakan nilai *heat loss* pada TES tank sebesar 2 % dari kapasitas penyimpanan setiap jam. Untuk menentukan nilai optimal dari permasalahan fungsi tujuan (3.1), maka ditentukan fungsi batas dari sistem TES adalah sebagai berikut:

- Batas kapasitas *chiller* dengan  $t: 1, 2 \dots 24 \text{ jam}$

$$0 < X(t) \leq X_{\max} \quad (3.2)$$

- Batas kapasitas TES tank dengan  $t = 1, 2 \dots 24 \text{ jam}$

$$\sum_{t=1}^{17} V_{TES}(t) = \sum_{t=17}^{22} B(t) \quad (3.3)$$

Kapasitas *chiller* bergantung pada kebutuhan beban pendinginan gedung. Nilai  $X_{\max}$  menunjukkan jumlah kapasitas *chiller* yang sesuai dengan kebutuhan beban pendinginan setiap gedung dengan mempertimbangkan beban puncak dari setiap gedung komersial.

Proses penyimpanan *chilled water*  $V_{TES}(t)$  ke dalam TES tank ditentukan selama 16 jam yakni saat LWBP pada pukul

00.00 WIB hingga 17.00 WIB. Jumlah kapasitas saat proses *charging* sama dengan kebutuhan beban pendinginan  $B(t)$  saat WBP yakni pukul 17.00 WIB hingga 22.00 WIB. Pemodelan sederhana dari TES *tank* yang bekerja pada  $t = 1, 2, \dots, 24$  jam ditunjukkan oleh Persamaan berikut:

$$V_{TES}(t+1) = V_{TES}(t) + X(t) - B(t) \quad (3.4)$$

dengan:

$V_{TES}(t+1)$	adalah kapasitas total TES <i>tank</i> (TR)
$V_{TES}(t)$	adalah proses <i>charging</i> setiap waktu (TR)
$X(t)$	adalah kapasitas <i>chiller</i> .(TR)
$B(t)$	adalah beban pendinginan gedung (TR).

Persamaan (3.4) menjelaskan dimana  $B(t)$  merupakan beban pendinginan gedung yang akan dipenuhi oleh *chilled water* dan  $X(t)$  adalah *chilled water* yang akan dikeluarkan untuk memenuhi beban pendinginan gedung. Jika  $x(t) - B(t)$  positif, maka TES *tank* sedang dilakukan pengisian (*charging*). Jika  $x(t) - B(t)$  negatif, maka *chilled water* akan di distribusikan ke dalam gedung untuk memenuhi beban pendinginan gedung (*discharging*).

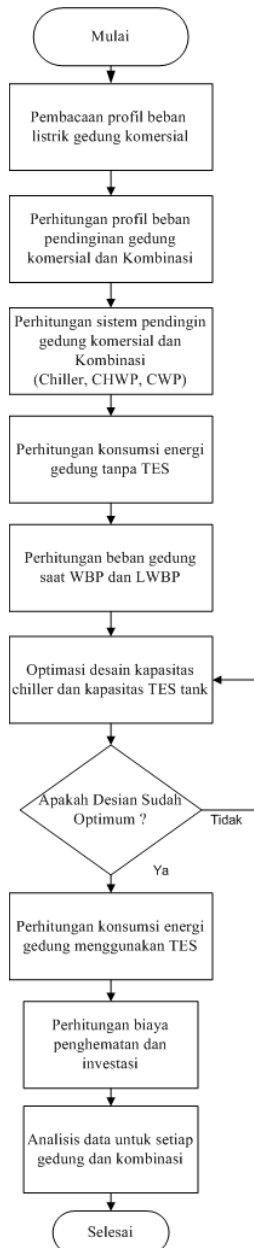
Fungsi tujuan dan fungsi batas pada permasalahan optimasi ini bersifat *linier*. Sehingga permasalahan optimasi dapat diselesaikan dengan metode optimasi *linier programming*. Salah satu metode optimasi *linier programming* adalah *simplex linier programming*.

### 3.5 Diagram Alir Penelitian

Secara umum penelitian ini dimulai dengan perhitungan model beban pendinginan gedung komersial serta kombinasi antar gedung. Selanjutnya dilakukan perhitungan konsumsi energi sistem pendingin menggunakan TES dengan mendefinisikan terlebih dahulu beban pendinginan saat WBP dan LWBP, selanjutnya dapat ditentukan fungsi tujuan dan fungsi batas dari



variabel optimasi. Optimasi dilakukan dengan menggunakan *simplex linier programming*. Selanjutnya dilakukan analisis investasi dan penghematan konsumsi listrik dari setiap gedung dan kombinasi antar gedung komersial. Diagram alir ditunjukkan pada **Gambar 3.5** berikut ini:



### Gambar 3.5 Diagram Alir Penelitian

Berdasarkan Gambar 3.5. diatas, tahapan-tahapan yang dilakukan adalah sebagai berikut.

- Penentuan profil beban listrik gedung komersial.  
Profil beban listrik gedung komersial diambil dari penelitian BPPT dan JICA 2012 sesuai pada Gambar 2.1
- Perhitungan profil beban pendinginan gedung komersial.  
Perhitungan profil beban pendinginan gedung komersial dilakukan dengan memperhatikan porsi penggunaan sistem pendingin dan waktu operasi sistem pendingin pada setiap gedung komersial.
- Perhitungan sistem pendingin gedung (*chiller plant*)  
Perhitungan sistem pendingin gedung meliputi: *chiller*, pompa CHWP, pompa CWP dan *cooling tower* sesuai dengan standar GBCI dan ASHRAE.
- Perhitungan beban gedung saat WBP dan LWP  
Perhitungan beban gedung saat WBP digunakan untuk menentukan fungsi batas dari kapasitas TES *tank*, agar mampu mencukupi beban pendinginan saat WBP.
- Optimasi desain kapasitas *chiller* dan TES *tank* yang optimal  
Dari beban pendinginan saat WBP dan LWB, maka dilakukan penentuan variabel optimasi yang terdiri dari fungsi batas (*constraint function*) dan fungsi tujuan (*objective function*). Tujuan optimasi adalah menentukan perbedaan kapasitas total *chiller* dan beban pendinginan minimum serta *heat loss* pada TES *tank* yang kecil dengan menggunakan metode *simplex linier programming*.
- Perhitungan konsumsi energi gedung  
Perhitungan konsumsi energi dilakukan dengan menghitung biaya listrik sistem pendingin menggunakan TES dan sistem pendingin tanpa TES (konvensional) untuk setiap gedung. Perhitungan biaya konsumsi listrik sesuai dengan harga tarif tenaga listrik pada Tabel 2.2

yang telah ditetapkan oleh PLN. Harga WBP diambil faktor pengali ( $k$ ) sebesar 2 dari harga LWBP.

- Perhitungan biaya penghematan dan investasi  
Perhitungan biaya penghematan listrik dilakukan dengan menghitung selisih biaya konsumsi listrik sistem konvensional dengan sistem pendingin menggunakan TES. Setelah didapatkan biaya penghematan listrik selanjutnya dilakukan perhitungan biaya investasi sesuai dengan Persamaan (2.9) dan (2.10).
- Analisis data  
Setelah dilakukan optimasi dan perhitungan biaya penghematan dan investasi, maka dilakukan analisis mengenai kapasitas *chiller* dan TES *tank* yang optimum untuk setiap gedung dan kombinasi antar gedung.

*(Halaman ini sengaja di kosongkan)*

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Perhitungan Konsumsi Energi *Chiller Plant*

Perhitungan konsumsi energi pada *chiller plant* digunakan untuk mengetahui konsumsi energi listrik dari *chiller plant* gedung komersial yang ditunjukkan oleh Tabel 4.1 dibawah ini:

**Tabel 4.1** Perhitungan energi sistem pendingin pusat perbelanjaan.

Gedung	Pusat Perbelanjaan		Formula
<i>Chilled water flow out/hours</i>	TR	1085,869	
<i>Chiller - Full Load</i>	kW/TR	0,576	ASHRAE
<i>Water Cooled Chiller - NPLV Calculation</i>	kW/TR	0,549	ASHRAE
<i>Primary Chiller Water Pump – CHWP</i>	kW/TR	0,097	Pump Calc.
<i>Condenser Water Pump – CWP</i>	kW/TR	0,061	Pump Calc
<i>Cooling Tower – CT</i>	kW/TR	0,003	Pump Calc
<i>Total Chiller Plant</i>	kW/TR	0,71	Total 3-6
<i>Chiller Plant Energy Consumption</i>	kW	771,38	Persamaan (2.8)
<b>Pump Energy Calculation</b>			
<i>Delta Chilled Water Temperature</i>	°F	10	ARI
<i>Chilled water Flow Rate</i>	GPM	2606,086	Persamaan (2.5)
<i>Pump Head</i>	Ft	150	GBCI
<i>Pump Efficiency</i>	%	70%	Design
<i>Pump kW</i>	kW	105,625	Persamaan (2.4)
	kW/TR	0,097	
<b>Condenser Water Pump</b>			
<i>Delta Condenser Water Temp.</i>	°F	10	ARI
<i>Condenser Water Flow Rate</i>	GPM	3257,607	Persamaan (2.7)
<i>Pump Head</i>	Ft	75	GBCI
<i>Pump Efficiency</i>	%	70%	Design
<i>Pump kW</i>	kW	66,0159	Persamaan (2.6)
	kW/TR	0,060795	

Tabel 4.1, menunjukkan penggunaan energi dari *chiller plant* pada gedung pusat perbelanjaan. Konsumsi energi *chiller plant*

bergantung pada beban pendinginan gedung setiap waktu. Nilai ini digunakan untuk menghitung biaya konsumsi listrik sistem pendingin gedung. Dengan cara yang sama maka dihasilkan perhitungan *chiller plant* untuk gedung komersial dan kombinasi antar gedung seperti pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3 berikut ini:

**Tabel 4.2** Hasil perhitungan *chiller plant* gedung komersial

Gedung	<i>Chilled water flow out / hours (TR)</i>	<i>Total chiller plant / hours (kW/TR)</i>	<i>Chiller plant energy consumption / hours (kW)</i>
Pusat perbelanjaan	1085	0,710	771,3
Rumah sakit	223	0,770	171,6
Hotel	163	0,776	126,8
Kantor swasta	90	0,867	77,6
Kantor pemerintah	33	0,936	30,7

**Tabel 4.3** Hasil perhitungan *chiller plant* kombinasi gedung

Kombinasi	<i>Chilled water flow out / hours (TR)</i>	<i>Total chiller plant / hours (kW/TR)</i>	<i>Chiller plant energy consumption / hours (kW)</i>
3,4	231	0,72	166,6
2,4	333	0,71	239,0
2,3	391	0,71	280,0
2,3,4	480	0,71	343,3
1,4	1253	0,70	889,3
1,3	1349	0,70	957,1
1,2	1361	0,70	926,0
1,3,4	1400	0,71	993,5
1,2,4	1447	0,71	1026,8
1,2,3	1506	0,70	1068,7
1,2,3,4	1592	0,70	1129,3

Penggunaan energi *chiller plant* bergantung pada jumlah *chilled water* yang diproduksi oleh *chiller*, nilai perhitungan energi *chiller plant* menentukan besar biaya pemakaian listrik sistem pendinginan gedung.

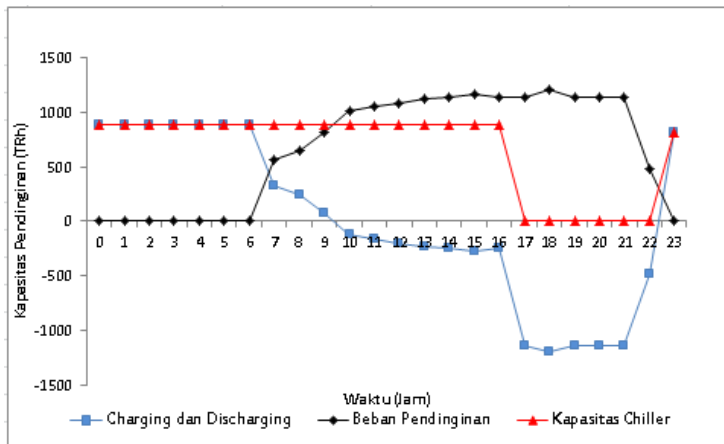
Konsumsi energi *chiller plant* terbesar terletak pada gedung pusat perbelanjaan. Hal ini disebabkan beban pendinginan gedung pusat perbelanjaan lebih besar dibandingkan dengan gedung komersial lainnya.

## 4.2 Hasil Simulasi Menggunakan Simplex LP

Setelah dilakukan perhitungan konsumsi energi *chiller plant* pada setiap gedung dan kombinasi antar gedung, maka proses selanjutnya dapat dilakukan perhitungan kapasitas *chiller* dan kapasitas TES tank serta *heat loss* pada TES tank. Perhitungan kapasitas *chiller* dan kapasitas TES tank didapatkan dari hasil optimasi. Dalam proses optimasi, fungsi objektif dan fungsi batas yang digunakan sesuai dengan Persamaan (3.1), (3.2) dan (3.3).

### 4.2.1 Pusat Perbelanjaan

Hasil optimasi gedung pusat perbelanjaan ditunjukkan pada Gambar 4.1 dibawah ini:



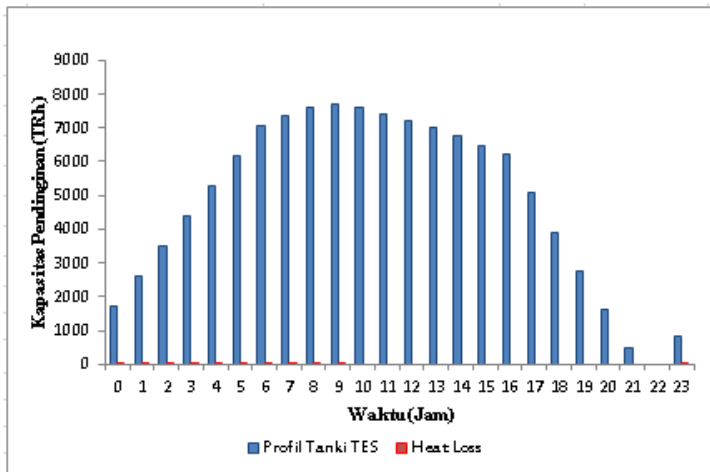
**Gambar 4.1** Profil beban pendinginan gedung pusat perbelanjaan terhadap waktu, kapasitas *chiller* terhadap waktu, proses *charging* dan *discharging* terhadap waktu.

Pada Gambar 4.1, proses penyimpanan *chilled water* (*charging*) dilakukan mulai pukul 23.00 WIB hingga pukul 09.00 WIB. Pada pukul 23.00 WIB, *chiller* memproduksi *chilled water* sebesar 890 TR untuk disimpan dalam TES tank.hingga pukul 09.00 WIB. Pada pukul 10.00 WIB hingga 16.00 WIB, *chiller* memproduksi *chilled water* sebesar 890 TR



untuk mencukupi beban pendinginan gedung, akan tetapi kapasitas *chiller* tidak mencukupi, sehingga TES *tank* membantu melakukan proses pengisian (*discharging*) untuk mencukupi beban pendinginan gedung pada rentang waktu tersebut.

Pada saat WBP, *chiller* berhenti beroperasi dan digantikan oleh TES *tank* untuk memenuhi beban pendinginan gedung saat WBP. Kapasitas *chiller* yang telah di optimasi untuk sistem TES pada gedung pusat perbelanjaan adalah sebesar 890 TR. Nilai kapasitas ini lebih kecil dibandingkan kapasitas *chiller* sistem konvensional gedung pusat perbelanjaan yang mencapai 1300 TR.



**Gambar 4.2** Profil kapasitas TES *tank* terhadap waktu dan *heat loss* pada TES *tank* terhadap waktu.

Gambar 4.2 menjelaskan profil kapasitas TES *tank* dan *heat loss* terhadap waktu yang terjadi selama proses *charging* dan *discharging*. Kapasitas maksimum TES *tank* terjadi pada pukul 09.00 WIB yakni sebesar 7692 TR. Dan pada pukul 10.00 WIB jumlah kapasitas TES *tank* berkurang selama proses *discharging*. *Heat loss* pada TES *tank* selama waktu penyimpanan dari pukul

23.00 WIB hingga pukul 09.00 WIB sebesar 154 TR. Dengan cara yang sama, hasil simulasi untuk setiap gedung komersial ditunjukkan pada (Lampiran A) dan disederhanakan pada Tabel 4.4 sebagai berikut:

**Tabel 4.4** Hasil optimasi kapasitas *chiller* dan TES *tank* pada setiap gedung komersial.

Gedung	<i>Charging period</i> (Jam)	Kapasitas <i>Chiller</i> (TR)	Kapasitas TES <i>tank</i> (TR)	Volume TES <i>tank</i> (m <sup>3</sup> )	<i>Heat loss</i> TES <i>tank</i> (TR)
Pusat perbelanjaan	10	890	7692	2327	154
Rumah sakit	8	180	805	247	18
Hotel	15	165	901	273	20
Kantor swasta	7	70	496	150	10
Kantor pemerintah	7	17	132	40	2

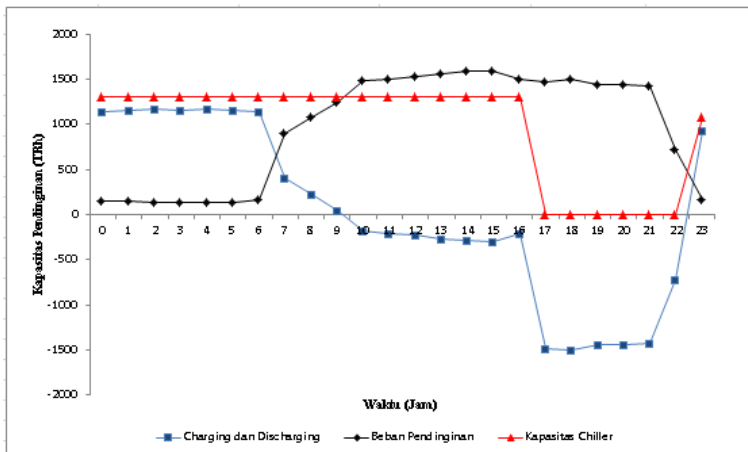
Pada Tabel 4.4, Gedung hotel memiliki *charging period* selama 15 jam. Pada saat proses *charging*, *chiller* memproduksi *chilled water* dengan kapasitas maksimal sebesar 165 TR dan dibutuhkan kapasitas TES *tank* sebesar 901 TR untuk memenuhi beban pendinginan gedung hotel saat WBP dengan *heat loss* sebesar 20 TR. Gedung kantor pemerintah memiliki *charging period* selama 7 jam. Pada saat proses *charging*, *chiller* memproduksi *chilled water* dengan kapasitas maksimum sebesar 17 TR dan dibutuhkan kapasitas TES *tank* sebesar 132 TR dan *heat loss* sebesar 2 TR. Jumlah kapasitas TES *tank* pada kantor pemerintah cukup kecil karena waktu operasi gedung berakhir pada pukul 18.00 WIB sehingga TES *tank* hanya memenuhi beban pendinginan selama 2 jam.

Gedung kantor swasta memiliki *charging period* selama 7 jam. Pada saat proses *charging*, *chiller* memproduksi *chilled water* dengan kapasitas maksimal sebesar 70 TR. Kapasitas TES *tank* gedung kantor swasta sebesar 496 TR dengan *heat loss* pada TES *tank* sebesar 10 TR.

Gedung rumah sakit memiliki *charging period* selama 8 jam. Pada saat proses *charging*, *chiller* memproduksi *chilled water* dengan kapasitas maksimal sebesar 180 TR dengan kapasitas TES *tank* sebesar 805 TR dan *heat loss* pada TES *tank* sebesar 18 TR.

#### 4.2.2 Kombinasi Antar Gedung

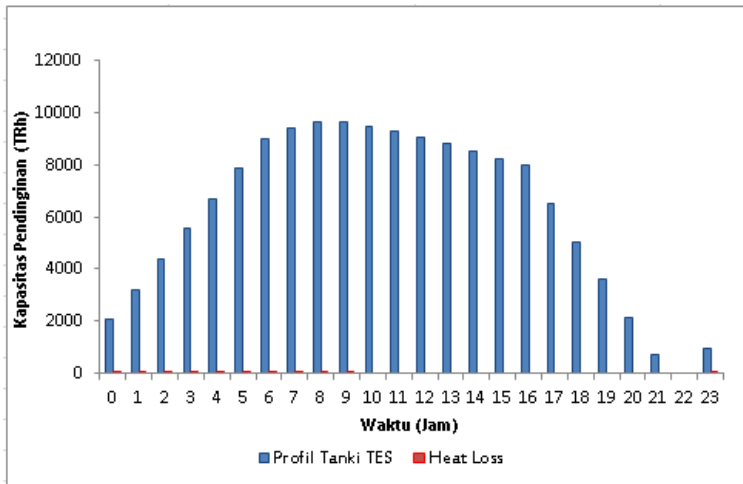
Hasil optimasi untuk kombinasi 1,2,3,4 ditunjukkan oleh **Gambar 4.3** sebagai berikut:



**Gambar 4.3** Profil beban pendinginan kombinasi 1,2,3,4 terhadap waktu, Kapasitas *chiller* terhadap waktu, proses *charging* dan *discharging* terhadap waktu.

Pada **Gambar 4.3** proses penyimpanan *chilled water* (*charging*) dilakukan mulai pukul 23.00 WIB hingga pukul 09.00 WIB. Pada pukul 23.00 WIB, *chiller* memproduksi *chilled water* sebesar 1300 TR untuk disimpan dalam TES *tank* hingga pukul 09.00 WIB. Pada pukul 10.00 WIB hingga 16.00 WIB *chiller* memproduksi *chilled water* sebesar 1300 TR untuk mencukupi beban pendinginan gedung, akan tetapi kapasitas *chiller* tidak mencukupi, sehingga TES *tank* membantu melakukan proses pengisian (*discharging*) untuk mencukupi beban pendinginan gedung pada rentang waktu tersebut.

Pada saat WBP, *chiller* berhenti beroperasi dan digantikan oleh TES *tank* untuk memenuhi beban pendinginan gedung saat WBP. Kapasitas *chiller* yang telah di optimasi untuk sistem TES pada gedung pusat perbelanjaan sebesar 1300 TR. Nilai kapasitas ini lebih kecil dibandingkan kapasitas *chiller* sistem konvensional gedung pusat perbelanjaan yang mencapai 1700 TR.



**Gambar 4.4** Profil kapasitas TES *tank* terhadap waktu dan *heat loss* pada TES *tank* terhadap waktu untuk kombinasi 1,2,3,4.

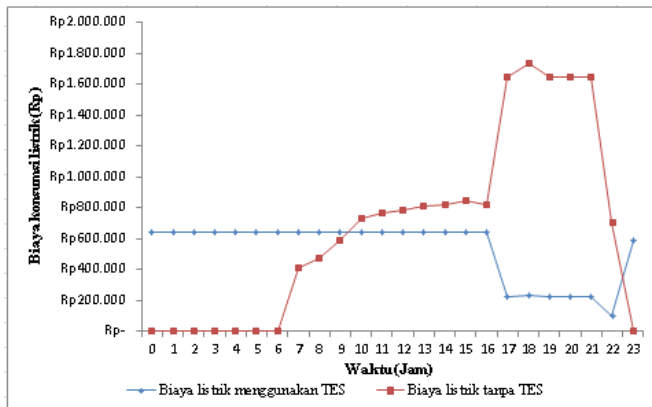
Gambar 4.4 menjelaskan profil kapasitas TES *tank* dan *heat loss* terhadap waktu yang terjadi selama proses *charging* dan *discharging*. Kapasitas maksimum TES *tank* terletak pada pukul 09.00 WIB yakni sebesar 9680 TR dan pada pukul 10.00 WIB jumlah kapasitas TES *tank* berkurang selama proses *discharging*. *Heat loss* pada TES *tank* selama waktu penyimpanan dari pukul 23.00 WIB hingga pukul 09.00 WIB sebesar 194 TR. Dengan cara perhitungan yang sama, hasil simulasi untuk setiap kombinasi gedung komersial ditunjukkan pada (Lampiran A) dan disederhanakan pada Tabel 4.5 berikut ini:

**Tabel 4.5** Hasil optimasi kapasitas *chiller* dan TES *tank* pada kombinasi gedung komersial.

Kombinasi	Charging period (Jam)	Kapasitas Chiller (TR)	Kapasitas TES tank (TR)	Volume TES tank (m <sup>3</sup> )	Heat loss TES tank (TR)
3,4	9	250	1277	378	25
2,4	8	228	1249	386	26
2,3	9	350	1491	451	26
2,3,4	8	405	2087	631	42
1,4	10	1000	7847	2374	157
1,3	10	1070	8446	2569	170
1,2	10	1127	8972	2555	169
1,3,4	10	1050	8491	2686	178
1,2,4	10	1127	8877	2714	179
1,2,3	10	1230	9245	2797	185
1,2,3,4	10	1300	9680	2928	194

### 4.3 Analisis Biaya Penghematan Listrik

Perhitungan biaya penghematan listrik adalah dengan menghitung selisih biaya konsumsi listrik sistem pendingin konvensional dan sistem pendingin menggunakan, yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 berikut



**Gambar 4.5** Profil biaya penggunaan listrik sistem pendingin gedung pusat perbelanjaan menggunakan TES dan tanpa TES terhadap waktu.

Biaya penggunaan listrik sistem pendingin dipengaruhi oleh kapasitas *chiller*. Semakin kecil kapasitas *chiller* dalam mencukupi kebutuhan WBP dan LWBP akan menghasilkan biaya penghematan yang cukup besar. Perbedaan tarif listrik saat WBP dan LWBP juga mempengaruhi besar biaya penghematan listrik sistem TES. Dalam penelitian M.M Rahman dan M.G Rasul [19] menjelaskan mengenai analisis kelayakan dari segi ekonomi sistem TES yang diterapkan pada bangunan sekolah di Australia dengan selisih tariff WBP sebesar 3 kali lipat dari harga LWBP dapat meningkatkan penghematan biaya listrik hingga 61 %.

Selain tarif WBP yang lebih mahal, faktor yang dapat meningkatkan penghematan listrik adalah interval WBP. WBP di Indonesia ditetapkan pada pukul 17.00 WIB hingga 22.00 WIB dan sebaliknya untuk LWBP ditetapkan pada pukul 23.00 WIB hingga 16.00 WIB, sehingga interval WBP selama 5 jam dan LWBP selama 19 jam. Berbeda dengan Malaysia dan Australia, WBP dimulai pada pukul 07.00 WIB hingga 21.00 WIB dan sebaliknya untuk LWBP pada pukul 22.00 WIB hingga 06.00 WIB. Rentang WBP selama 14 jam dan LWBP selama 10 jam [6,18,19]. Semakin lama interval WBP akan semakin meningkatkan penghematan listrik disebabkan pada saat WBP *chiller* akan berhenti operasi.

Namun semakin lama interval WBP akan mengakibatkan kapasitas *chiller* dan kapasitas TES untuk mencukupi beban pendinginan gedung akan semakin besar. Hal ini akan mempengaruhi biaya investasi dari *chiller* dan TES *tank* akan semakin besar.

Dengan cara yang sama diperoleh biaya penghematan untuk setiap gedung komersial pada Tabel 4.6 berikut ini:

**Tabel 4.6** Biaya penghematan listrik setiap gedung komersial.

Gedung	Biaya Listrik menggunakan TES/hari (Rp)	Biaya Listrik tanpa TES/hari (Rp)	Biaya Penghematan/hari (Rp)	Penghematan (%)
--------	---	-----------------------------------	-----------------------------	-----------------

Pusat perbelanjaan	12.782.677	16.070.848	3.288.170	20%
Rumah sakit	2.333.981	2.768.396	434.415	16%
Hotel	2.279.792	2.843.576	563.783	20%
Kantor swasta	930.061	1.176.647	246.586	21%
Kantor pemerintah	221.296	279.572	58.276	21%

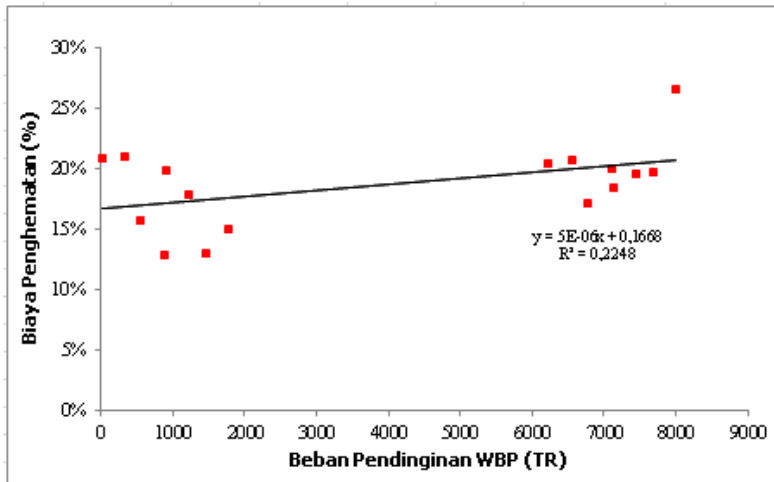
Pada Tabel 4.6, prosentase penghematan terbesar berada pada gedung kantor pemerintah dan kantor swasta. Hal ini disebabkan kapasitas *chiller* yang digunakan oleh kantor pemerintah dan swasta cukup kecil untuk mencukupi kebutuhan beban pendinginan saat WBP dan LWBP (lihat Tabel 4.4). Penerapan sistem TES pada kedua gedung dapat menghemat biaya konsumsi listrik sebesar 21 %. Prosentase penghematan terkecil berada pada gedung rumah sakit sebesar 16%.

Pada Tabel 4.7 menunjukkan biaya penghematan listrik terhadap kombinasi gedung komersial. Kombinasi gedung komersial diurutkan berdasarkan biaya penghematan dari nilai yang terkecil ke nilai yang terbesar, untuk melihat hubungan beban pendinginan gedung komersial saat WBP dengan biaya penghematan listrik.

**Tabel 4.7** Biaya penghematan listrik kombinasi gedung

Kombinasi	Total Beban Pendinginan WBP (TR)	Biaya Penghematan (%)
2,4	882	13%
2,3	1459	13%
2,3,4	1783	15%
1,2	6781	17%
3,4	1225	18%
1,3	7125	18%
1,3,4	7449	20%
1,2,3	7682	20%
1,2,4	7105	20%
1,4	6548	21%
1,2,3,4	8006	27%

Dari Tabel 4.7 dibuat grafik hubungan antar beban pendinginan gedung saat WBP dengan biaya penghematan listrik yang ditunjukkan pada Gambar 4.6 berikut ini:



**Gambar 4.6** Grafik hubungan beban pendinginan gedung saat WBP dengan biaya penghematan listrik.

Pada Gambar 4.6 menunjukkan hubungan beban pendinginan WBP dengan biaya penghematan listrik sesuai dengan pola persamaan regresi  $y = 0,000005x + 0,1668$  dengan koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,2248, yang mana nilai koefisien mendekati angka 0. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh beban pendinginan saat WBP terhadap biaya penghematan listrik tidak terlalu signifikan, hal ini dikarenakan interval WBP yang singkat mengakibatkan biaya penghematan tidak berubah secara signifikan meskipun beban pendinginan WBP semakin besar.

Penerapan sistem TES pada gedung komersial di Indonesia terbatas pada gedung dengan kapasitas beban pemakaian listrik diatas 200 kVA, sebab pada pemakaian beban diatas 200 kVA, PLN menetapkan tarif WBP mencapai harga 2 kali tarif LWBP,



selain pada pemakaian beban di atas 200 kVA, PLN tidak memberlakukan sistem blok LWBP dan blok WBP [3].

#### 4.4 Analisis Biaya Investasi

Kelayakan investasi sistem TES tidak dapat diketahui hanya dengan melihat besarnya biaya penghematan listrik, untuk melihat peluang penerapan sistem TES pada gedung komersial dibutuhkan analisis investasi pada setiap gedung dan kombinasinya.

Secara umum biaya investasi sistem pendingin konvensional atau terdiri dari investasi *chiller*, investasi pompa CHWP dan CWP dan biaya operasional sistem pendingin konvensional untuk perhitungan biaya investasi sistem pendingin konvensional gedung pusat perbelanjaan ditunjukkan pada Tabel 4.8 berikut ini:

**Tabel 4.8** Biaya investasi sistem pendingin konvensional gedung pusat perbelanjaan.

No	Deskripsi	Biaya Investasi sistem pendingin konvensional		
		Volume	Satuan	Harga (Rp)
1	Chiller	1300	TR	6.500.000.000
2	CHWP	146	kW	467.823.765
3	CWP	90	kW	288.384.513
4	Cooling Tower	4100	GPM	984.000.000
5	Biaya Operasional Listrik per tahun			5.865.859.434
Jumlah				14.106.067.712

Sedangkan untuk biaya investasi sistem pendingin menggunakan TES gedung pusat perbelanjaan ditambahkan biaya investasi TES *tank* sesuai dengan Persamaan (2.9) yang ditunjukkan pada Tabel 4.9 berikut ini.

**Tabel 4.9** Biaya investasi sistem pendingin menggunakan TES.

No	Deskripsi	Biaya Investasi TES		
		Volume	Satuan	Harga (Rp)
1	<i>Chiller</i>	890	TR	4.450.000.000
2	CHWP	172	kW	551.134.846
3	CWP	54	kW	173.030.708
4	<i>Cooling Tower</i>	2670	GPM	640.800.000
	TES <i>tank</i>	2327	m <sup>3</sup>	2.079.005.748

5	Biaya Operasional Listrik per tahun		4.665.677.246
Jumlah			12.559.648.548

Harga untuk peralatan *chiller* dan *chiller plant* mengikuti [20] dengan asumsi kurs mata uang dollar dalam rupiah sebesar Rp. 12.000 dan untuk TES *tank* terbuat dari bahan beton [7] dengan estimasi harga untuk bahan beton di Indonesia sebesar Rp.3.000.000/m<sup>3</sup> [21].

**Tabel 4.10** Biaya investasi dan biaya penghematan sistem TES pada gedung komersial

Gedung	Biaya Penghematan (Rp)	Biaya Investasi (Rp)	<i>Payback period</i> (Tahun)	ROI (%)
Pusat perbelanjaan	1.546.419.164	14.106.067.712	9	11
Rumah sakit	736.016.380	2.877.065.401	4	26
Hotel	750.639.309	2.982.093.094	4	25
Kantor swasta	852.886.515	1.816.808.661	2	47
Kantor pemerintah	119.242.918	343.309.547	3	35

Pada Tabel 4.10, selisih biaya investasi sistem pendingin konvensional dengan biaya investasi sistem pendingin menggunakan TES merupakan biaya penghematan dari investasi sistem TES.

Pada Tabel 4.10, gedung kantor swasta memiliki nilai ROI yang paling besar diantara gedung komersial lainnya dengan nilai ROI sebesar 47 % dan *payback period* selama 2 tahun. Begitu juga sebaliknya gedung pusat perbelanjaan memiliki nilai ROI yang paling kecil diantara gedung komersial lainnya yakni sebesar 11 % dengan *payback period* selama 9 tahun.

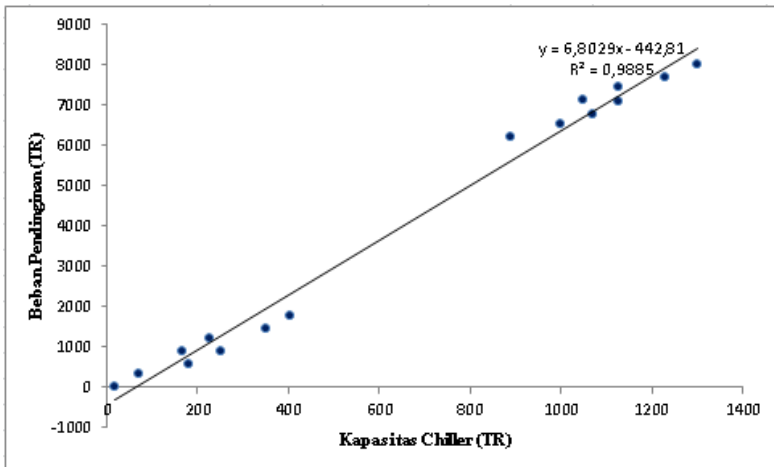
Hasil perhitungan *payback period* dan ROI pada kombinasi beban pendinginan gedung ditunjukkan pada Tabel 4.11 berikut ini.

**Tabel 4.11** Hasil perhitungan *payback period* dan ROI pada kombinasi gedung komersial.

Kombinasi	Beban pendinginan (TR)	<i>Payback period</i> (Tahun)	ROI (%)
2,4	882	5	19%
1,2,3,4	1225	8	13%
1,3	1459	8	12%
3,4	1783	10	10%
2,3	6548	12	9%
1,4	6781	12	8%
1,2,4	7105	15	7%
1,2	7125	15	7%
2,3,4	7449	17	6%
1,2,3	7682	22	5%
1,3,4	8006	27	4%

Warna biru pada Tabel 4.11 menunjukkan bahwa kombinasi beban pendinginan yang tidak layak investasi, sebab kelayakan investasi sistem TES memiliki waktu balik modal (*payback period*) paling lama adalah 10 tahun [19]. Kombinasi 2,4 merupakan kombinasi dengan nilai ROI yang paling tinggi yakni sebesar 19 % dan *payback period* selama 5 tahun. Kombinasi beban pendinginan terbesar selanjutnya adalah kombinasi 1,2,3,4 yang memiliki ROI sebesar 13 % dengan *payback period* selama 8 tahun.

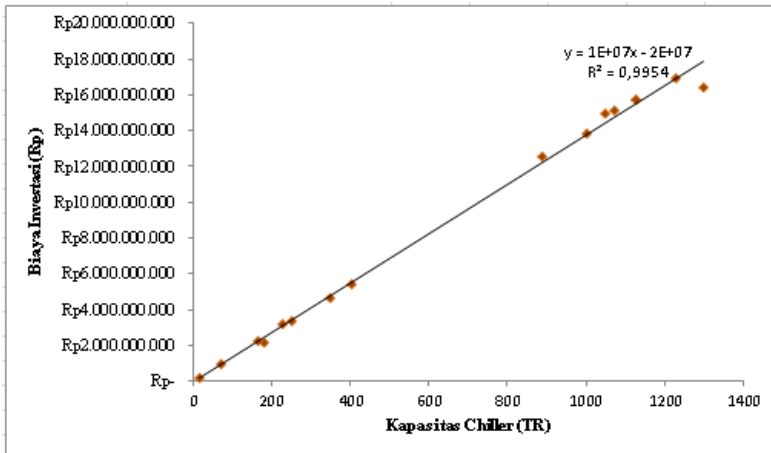
Pada Gambar 4.7 menunjukkan hubungan beban pendinginan terhadap kapasitas *chiller* yang mengikuti pola Persamaan regresi  $y = 6,8x - 442,81$  dengan koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,98. Jika dilihat dari koefisien determinasi yang mendekati angka 1, hal ini menunjukkan bahwa kapasitas *chiller* bergantung pada beban pendinginan gedung, semakin besar beban pendinginan gedung, maka kapasitas *chiller* yang dibutuhkan akan semakin besar.



**Gambar 4.7** Grafik hubungan kapasitas *chiller* terhadap beban pendinginan

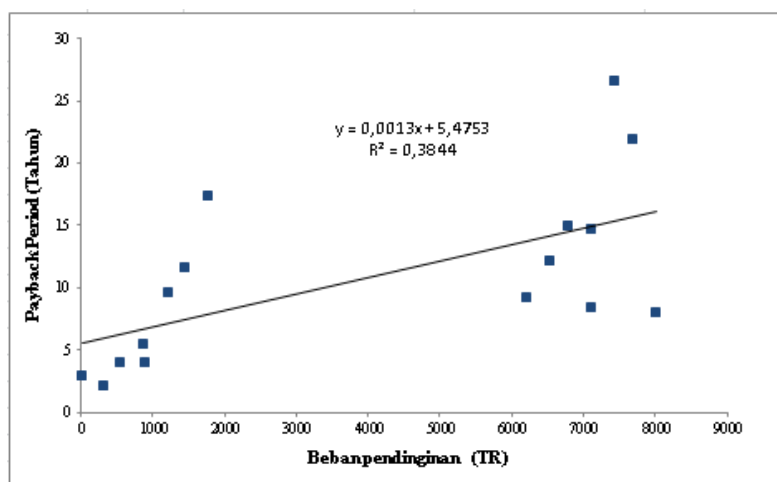
Pada Gambar 4.8 menunjukkan hubungan kapasitas *chiller* terhadap biaya investasi mengikuti persamaan regresi  $y = 0,0000001x - 0,0000002$  dengan koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,99 yang mana nilai koefisien mendekati angka 1. Hal ini menunjukkan bahwa kapasitas *chiller* bergantung pada biaya investasi, semakin besar beban pendinginan gedung, maka biaya investasi akan semakin besar bahwa.

Dari Gambar 4.7 dan Gambar 4.8 menunjukkan semakin besar beban pendinginan gedung maka semakin besar pula biaya investasi gedung.

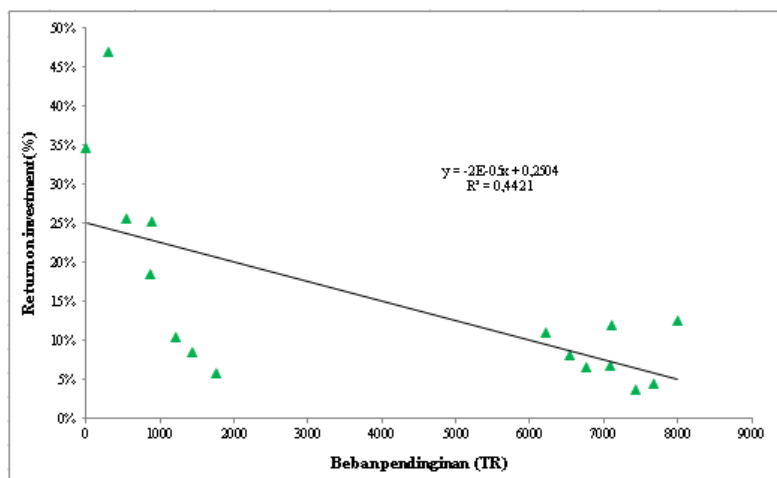


**Gambar 4.8** Grafik hubungan kapasitas *chiller* terhadap biaya investasi sistem TES.

Pada Gambar 4.9 menunjukkan hubungan beban pendinginan terhadap *payback period* yang mengikuti pola Persamaan regresi  $y = 0,0013x + 5,47$  dengan koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,384. Jika dilihat dari nilai koefisien determinasi yang mendekati angka 0, hubungan antar beban pendinginan terhadap *payback period* tidak terlalu signifikan. Kemudian pada Gambar 4.8 menunjukkan hubungan beban pendinginan terhadap ROI yang mengikuti pola persamaan regresi  $y = -0,00002x + 0,25$  dengan koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,44 yang mana nilai tersebut mendekati angka 0. Hal ini menunjukkan bahwa hubungan beban pendinginan terhadap ROI dan *payback period* tidak signifikan, sebab jika beban pendinginan semakin besar belum tentu menghasilkan nilai ROI yang kecil atau *payback period* yang lama. Begitupun sebaliknya, jika beban pendinginan semakin kecil belum tentu memiliki nilai ROI yang besar dan *payback period* yang singkat.



**Gambar 4.9** Grafik hubungan beban pendinginan terhadap *payback period*.



**Gambar 4.10** Grafik hubungan kombinasi beban pendinginan terhadap ROI.

Nilai ROI dan *payback period* bergantung pada biaya penghematan. Untuk dapat memperbesar biaya penghematan adalah dengan cara memperkecil biaya investasi sistem pendingin TES terhadap biaya investasi sistem pendingin konvensional. Oleh karena itu optimasi sistem TES diperlukan dalam menentukan kapasitas *chiller* dan TES *tank* yang optimal untuk menghasilkan biaya penghematan yang besar. Dalam penerapan sistem TES, investasi terbesar terletak pada *chiller* dan TES *tank*, Namun semakin besar kapasitas *chiller* maka biaya operasional dan perawatan *chiller* akan semakin besar [22].





## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Dari hasil optimasi, didapatkan nilai kapasitas *chiller*, kapasitas TES *tank* dan *heat loss* pada TES *tank* yang optimum adalah sebagai berikut:
  - Gedung hotel dengan kapasitas *chiller* sebesar 165 TR, kapasitas TES *tank* sebesar 901 TR dan *heat loss* pada TES *tank* sebesar 20 TR dengan *charging period* selama 15 jam dan penghematan sebesar 20 %.
  - Gedung kantor pemerintah dengan kapasitas *chiller* sebesar 17 TR, kapasitas TES *tank* sebesar 132 TR dan *heat loss* pada TES *tank* sebesar 2 TR dengan *charging period* selama 7 jam dan penghematan sebesar 21 %.
  - Gedung kantor swasta dengan kapasitas *chiller* sebesar 70 TR, kapasitas TES *tank* sebesar 325 TR dan *heat loss* pada TES *tank* sebesar 496 TR dengan *charging period* selama 7 jam dan penghematan sebesar 21 %.
  - Gedung rumah sakit dengan kapasitas *chiller* sebesar 180 TR, kapasitas TES *tank* sebesar 815 TR dan *heat loss* pada TES *tank* sebesar 18 TR dengan *charging period* selama 8 jam dan penghematan sebesar 16 %.
  - Gedung pusat perbelanjaan dengan kapasitas *chiller* sebesar 890 TR, kapasitas TES *tank* sebesar 7692 TR dan *heat loss* pada TES *tank* sebesar 154 TR dengan *charging period* selama 10 jam dan penghematan listrik sebesar 20 %.
2. Penerapan sistem TES pada setiap gedung komersial dapat menghasilkan biaya penghematan penggunaan listrik rata-rata mencapai 19,6%. Penghematan terbesar terjadi pada gedung kantor pemerintah dan kantor swasta yang mencapai

21 %, untuk kantor swasta ROI sebesar 47 % dan *payback period* selama 2 tahun dan untuk kantor pemerintah ROI sebesar 35 % dan *paybak period* selama 3 tahun. Nilai ROI dan *payback period* tidak bergantung pada besarnya beban pendinginan gedung, sedangkan kapasitas *chiller* dan TES *tank* akan meningkat seiring bertambahnya beban pendinginan gedung komersial.

## 5.2 Saran

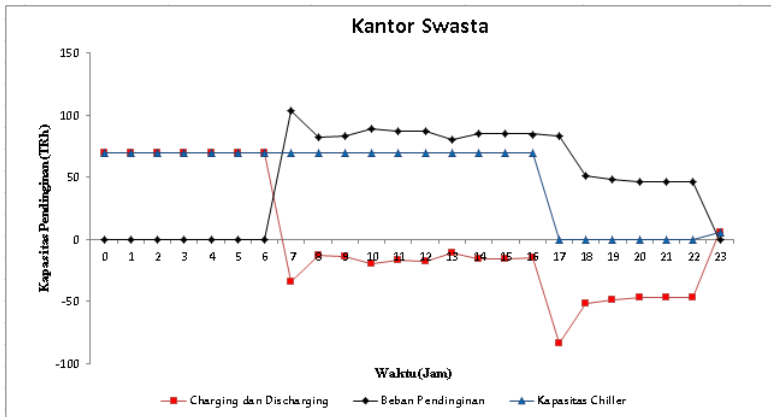
Adapun saran yang bisa dilakukan untuk penelitian selanjutnya yaitu:

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terhadap jumlah *chiller* yang akan dipasang pada sistem TES yang optimal sesuai dengan kapasitas *chiller* pada gedung.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut tentang strategi perubahan temperature pada TES *tank* yang mengakibatkan perubahan energi yang disimpan saat proses *charging* agar mendapatkan peningkatan performansi sistem TES.

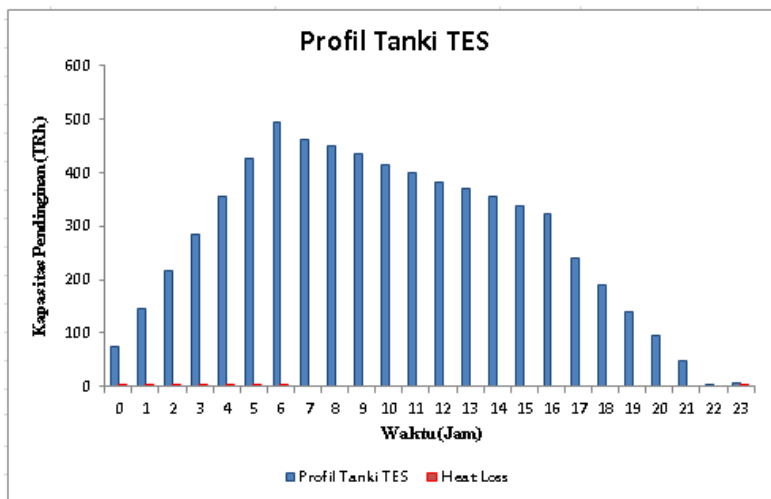
## LAMPIRAN A

### 1. Hasil simulasi optimasi untuk setiap gedung komersial dan kombinasi

Hasil Simulasi Kantor Swasta							
Waktu (Jam)	Beban Pendinginan (TR)	Kapasitas Chiller (TR)	<i>Charging</i> dan <i>Discharging</i> (TR)	<i>Heat</i> <i>Loss</i> (TR)	Kapasitas TES <i>tank</i> (TR)	Biaya konsumsi listrik menggunakan TES (Rp)	Biaya konsumsi listrik tanpa TES (Rp)
0	0	70	70	1	76	50694	0
1	0	70	70	1	146	50694	0
2	0	70	70	1	216	50694	0
3	0	70	70	1	286	50694	0
4	0	70	70	1	356	50694	0
5	0	70	70	1	426	50694	0
6	0	70	70	1	496	50694	0
7	104	70	-34	0	462	50694	78678
8	83	70	-13	0	449	50694	63428
9	84	70	-14	0	435	50694	63910
10	90	70	-20	0	416	50694	68247
11	87	70	-17	0	399	50694	66319
12	88	70	-18	0	381	50694	66801
13	81	70	-11	0	370	50694	61982
14	86	70	-16	0	355	50694	65355
15	86	70	-16	0	339	50694	65548
16	85	70	-15	0	324	50694	64873
17	84	0	-84	0	241	16574	127819
18	51	0	-51	0	189	10181	81557
19	49	0	-49	0	141	9652	77701
20	47	0	-47	0	94	9255	74810
21	47	0	-47	0	47	9255	74810
22	47	0	-47	0	0	9255	74810
23	0	6	6	0	6	4090	0
Jumlah	1195	1196	0	8	496	930061	1176647

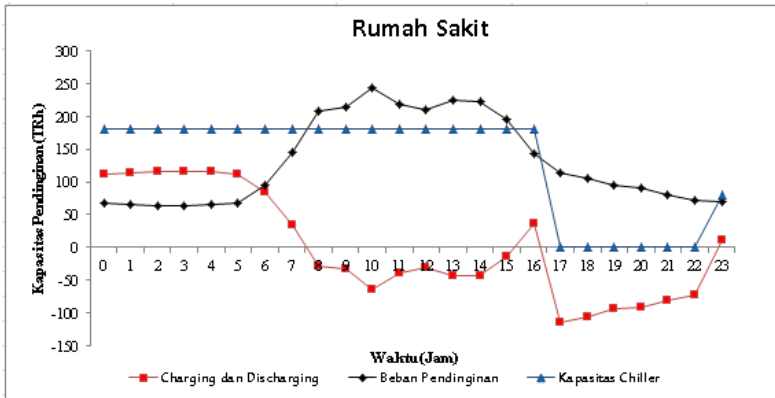


Gambar 1 Hasil simulasi gedung kantor swasta

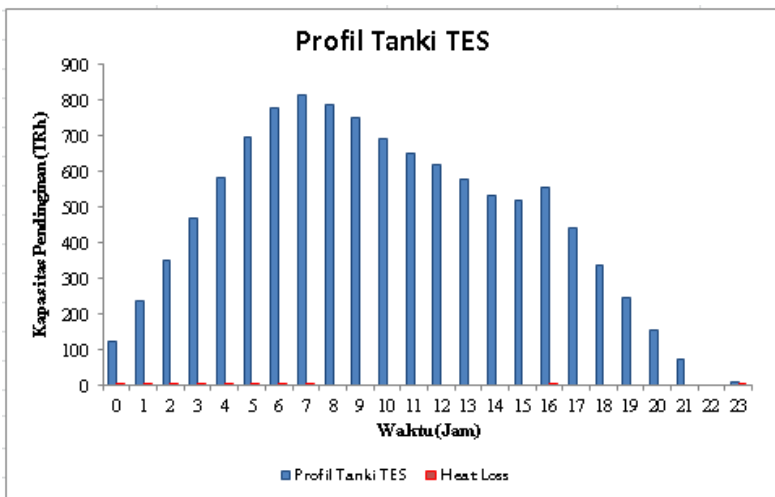


Gambar 2 Hasil simulasi profil TES tank gedung kantor swasta

Hasil Simulasi Rumah Sakit							
Waktu (Jam)	Beban Pendinginan (TR)	Kapasitas Chiller (TR)	<i>Charging dan Discharging</i> (TR)	<i>Heat Loss</i> (TR)	Kapasitas TES tank (TR)	Biaya konsumsi listrik menggunakan TES (Rp)	Biaya konsumsi listrik tanpa TES (Rp)
0	68	180	112	2	122	130356	52764
1	66	180	114	2	236	130356	51595
2	64	180	116	2	352	130356	49842
3	63	180	117	2	469	130356	49258
4	65	180	115	2	584	130356	50427
5	68	180	112	2	696	130356	52764
6	95	180	85	2	781	130356	72051
7	146	180	34	1	815	130356	108870
8	208	180	-28	0	787	130356	153871
9	213	180	-33	0	754	130356	157378
10	243	180	-63	0	691	130356	179002
11	219	180	-39	0	652	130356	161469
12	211	180	-31	0	621	130356	155624
13	224	180	-44	0	577	130356	164975
14	223	180	-43	0	535	130356	164391
15	194	180	-14	0	520	130356	143936
16	143	180	37	1	558	130356	106532
17	113	0	-113	0	444	22512	170985
18	105	0	-105	0	339	20846	159296
19	94	0	-94	0	245	18601	142932
20	92	0	-92	0	153	18120	139426
21	80	0	-80	0	73	15875	123062
22	73	0	-73	0	0	14432	112542
23	69	79	10	2	10	7543	45405
	3139	3139	0	18	815	2333981	2768396

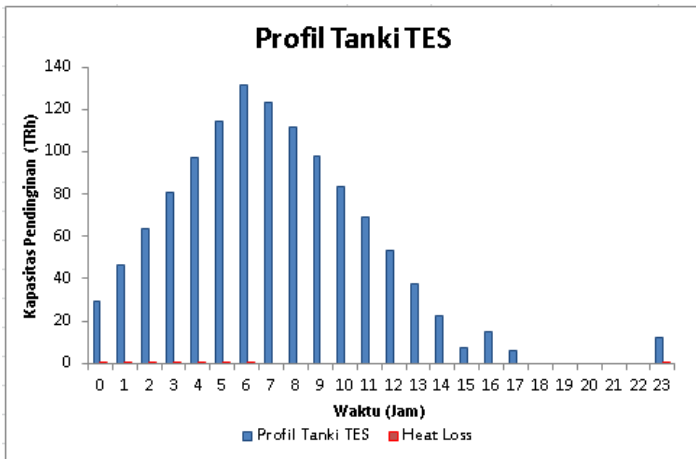


Gambar 3 Hasil simulasi gedung rumah sakit

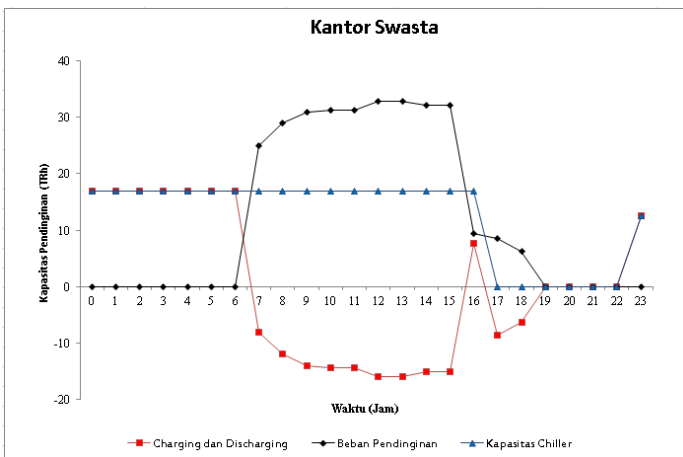


Gambar 4 hasil simulasi profil TES *tank* gedung rumah sakit

Hasil Simulasi Kantor Pemerintah							
Waktu (Jam)	Beban Pendinginan (TR)	Kapasitas Chiller (TR)	<i>Charging dan Discharging</i> (TR)	<i>Heat Loss</i> (TR)	Kapasitas TES <i>tank</i> (TR)	Biaya konsumsi listrik menggunakan TES (Rp)	Biaya konsumsi listrik tanpa TES (Rp)
0	0	17	17	0,34	30	12311	0
1	0	17	17	0,34	47	12311	0
2	0	17	17	0,34	64	12311	0
3	0	17	17	0,34	81	12311	0
4	0	17	17	0,34	98	12311	0
5	0	17	17	0,34	115	12311	0
6	0	17	17	0,34	132	12311	0
7	25	17	-8	0	123	12311	21718
8	29	17	-12	0	112	12311	24537
9	31	17	-14	0	98	12311	26003
10	31	17	-14	0	83	12311	26229
11	31	17	-14	0	69	12311	26229
12	33	17	-16	0	53	12311	27357
13	33	17	-16	0	37	12311	27357
14	32	17	-15	0	22	12311	26793
15	32	17	-15	0	7	12311	26793
16	9	17	8	0	15	12311	10439
17	9	0	-9	0	6	1707	19750
18	6	0	-6	0	0	1238	16367
19	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0
23	0	13	13	0	13	9058	0
Jumlah	302	302	0	2	132	221296	279572



Gambar 5 hasil simulasi profil TES *tank* gedung kantor swasta

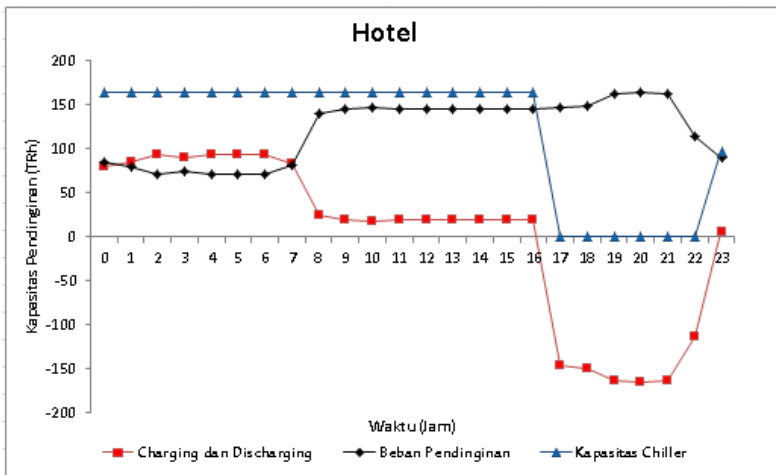


Gambar 6 Hasil simulasi gedung kantor swasta

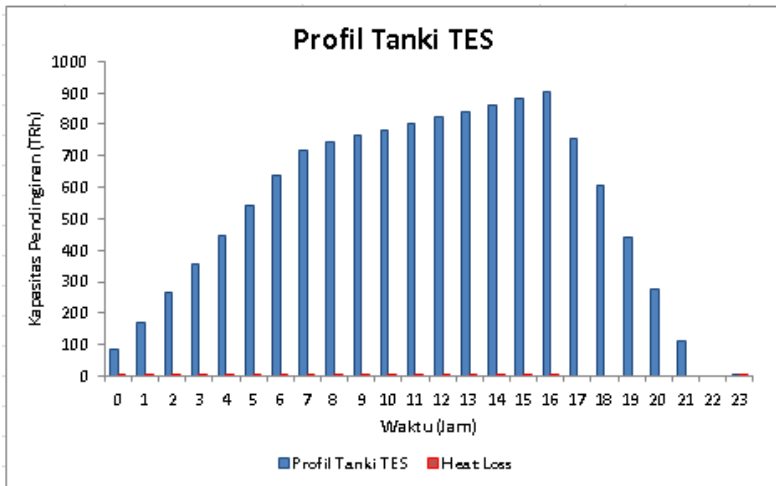


Hasil Simulasi Hotel

Waktu (Jam)	Beban Pendinginan (TR)	Kapasitas Chiller (TR)	<i>Charging dan Discharging</i> (TR)	<i>Heat Loss</i> (TR)	Kapasitas TES <i>tank</i> (TR)	Biaya konsumsi listrik menggunakan TES (Rp)	Biaya konsumsi listrik tanpa TES (Rp)
0	85	165	80	2	85	119493	65191
1	80	165	85	2	171	119493	61090
2	71	165	94	2	265	119493	54938
3	75	165	90	2	354	119493	58014
4	71	165	94	2	448	119493	54938
5	71	165	94	2	542	119493	54938
6	71	165	94	2	636	119493	54938
7	81	165	84	2	720	119493	62115
8	141	165	24	0	744	119493	105179
9	145	165	20	0	764	119493	108255
10	148	165	17	0	781	119493	110305
11	145	165	20	0	801	119493	108255
12	145	165	20	0	821	119493	108255
13	145	165	20	0	841	119493	108255
14	145	165	20	0	861	119493	108255
15	145	165	20	0	881	119493	108255
16	145	165	20	0	901	119493	108255
17	146	0	-146	0	755	29057	218560
18	149	0	-149	0	606	29539	222661
19	163	0	-163	0	442	32352	243168
20	165	0	-165	0	277	32633	245218
21	163	0	-163	0	114	32352	243168
22	114	0	-114	0	0	22506	171395
23	91	97	6	2	6	69973	59978
Jumlah	2902	2902	0	20	901	2279792	2843576



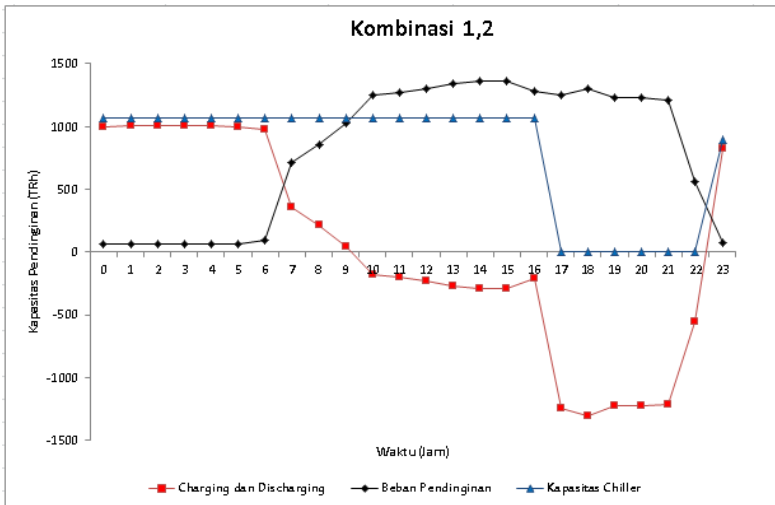
Gambar 7 Hasil simulasi gedung hotel



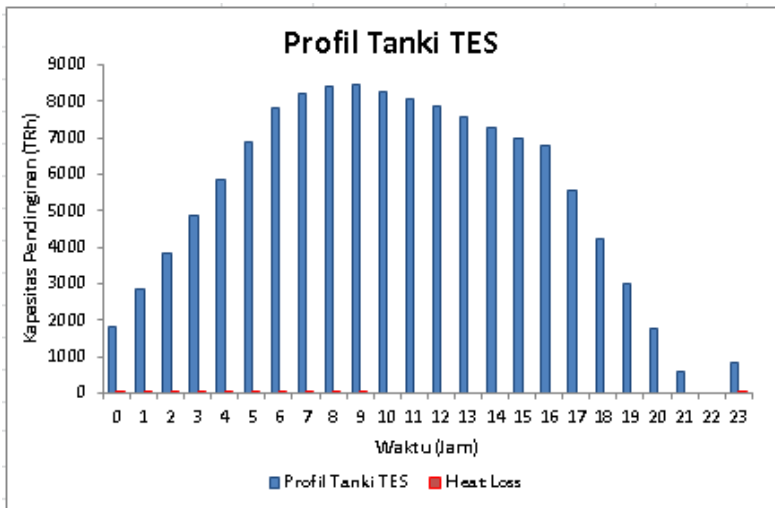
Gambar 8 Hasil simulasi profil TES *tank* gedung Hotel

Hasil Simulasi Kombinasi 1,2

Waktu (Jam)	Beban Pendinginan (TR)	Kapasitas Chiller (TR)	<i>Charging dan Discharging</i> (TR)	<i>Heat Loss</i> (TR)	Kapasitas TES <i>tank</i> (TR)	Biaya konsumsi listrik menggunakan TES (Rp)	Biaya konsumsi listrik tanpa TES (Rp)
0	68	1070	1002	20	1830	829415	52764
1	66	1070	1004	20	2834	830823	51595
2	64	1070	1006	20	3840	833069	49842
3	63	1070	1007	20	4846	833855	49258
4	65	1070	1005	20	5852	832301	50427
5	68	1070	1002	20	6853	829415	52764
6	95	1070	975	20	7829	813135	72051
7	713	1070	357	7	8186	777204	517972
8	857	1070	213	4	8399	776281	621417
9	1023	1070	47	1	8446	775533	741810
10	1248	1070	-178	0	8268	774843	903698
11	1272	1070	-202	0	8065	774782	921230
12	1297	1070	-227	0	7839	774725	938763
13	1342	1070	-272	0	7567	774622	971492
14	1357	1070	-287	0	7280	774589	982596
15	1361	1070	-291	0	6988	774580	985518
16	1277	1070	-207	0	6781	774771	924737
17	1248	0	-1248	0	5533	247636	1807395
18	1305	0	-1305	0	4228	258167	1889216
19	1228	0	-1228	0	3000	243094	1779342
20	1226	0	-1226	0	1774	242613	1775836
21	1215	0	-1215	0	559	240368	1759472
22	559	0	-559	0	0	110643	813860
23	69	897	828	17	828	641383	53349
Jumlah	19087	19087	0	169	8446	15537848	18766403



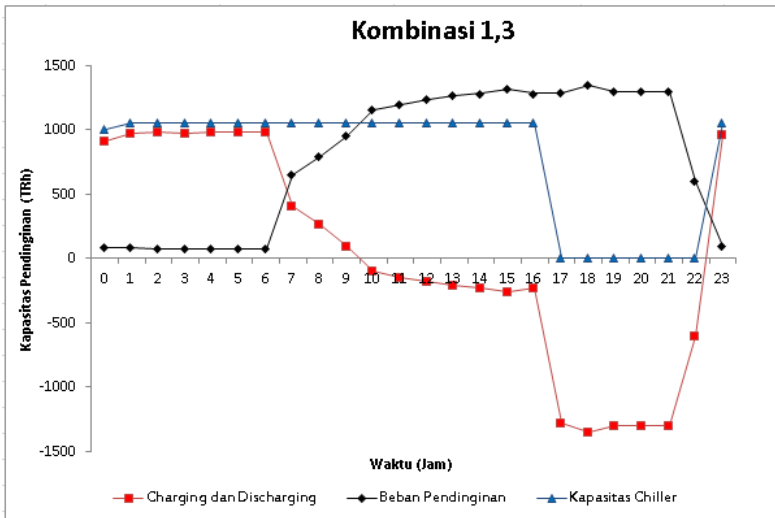
Gambar 9 Hasil simulasi kombinasi 1,2



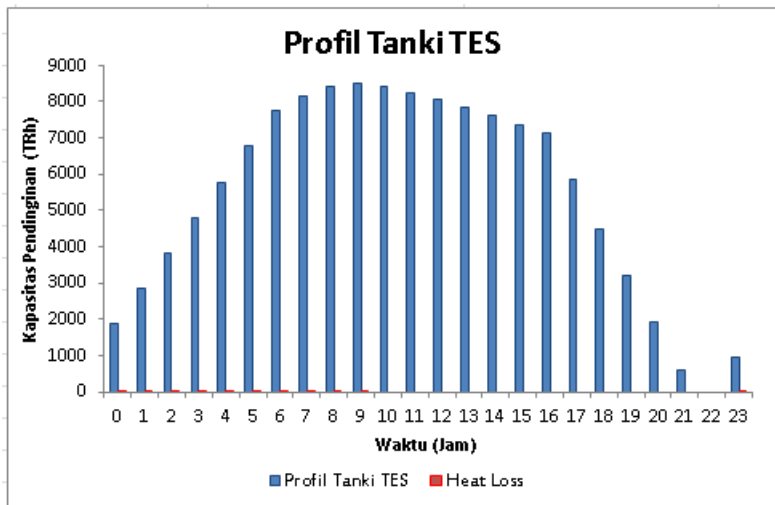
Gambar 10 Hasil simulasi profil TES *tank* kombinasi 1,2

Hasil Simulasi Kombinasi 1,3

Waktu (Jam)	Beban Pendinginan (TR)	Kapasitas Chiller (TR)	<i>Charging dan Discharging</i> (TR)	<i>Heat Loss</i> (TR)	Kapasitas TES <i>tank</i> (TR)	Biaya konsumsi listrik menggunakan TES (Rp)	Biaya konsumsi listrik tanpa TES (Rp)
0	85	999	914	18	1873	763730	65191
1	80	1050	970	19	2843	805699	61090
2	71	1050	979	20	3822	811511	54938
3	75	1050	975	19	4797	808440	58014
4	71	1050	979	20	5776	811511	54938
5	71	1050	979	20	6755	811511	54938
6	71	1050	979	20	7734	811511	54938
7	648	1050	402	8	8135	763217	471218
8	789	1050	261	5	8396	762157	572724
9	955	1050	95	2	8491	761306	692687
10	1153	1050	-103	0	8388	760615	835001
11	1198	1050	-148	0	8240	760487	868016
12	1231	1050	-181	0	8059	760402	891394
13	1263	1050	-213	0	7846	760322	914771
14	1280	1050	-230	0	7616	760283	926460
15	1312	1050	-262	0	7354	760209	949837
16	1280	1050	-230	0	7125	760283	926460
17	1281	0	-1281	0	5844	254181	1854970
18	1349	0	-1349	0	4495	266860	1952580
19	1298	0	-1298	0	3197	256845	1879578
20	1299	0	-1299	0	1898	257126	1881628
21	1298	0	-1298	0	600	256845	1879578
22	600	0	-600	0	0	118717	872714
23	91	1050	959	19	959	730353	69292
Jumlah	18849	18849	0	170	8491	15374120	18842954



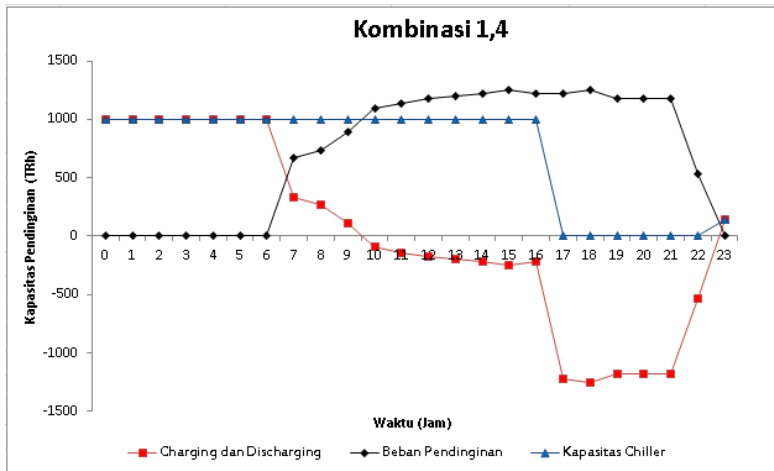
Gambar 11 Hasil simulasi kombinasi 1,3



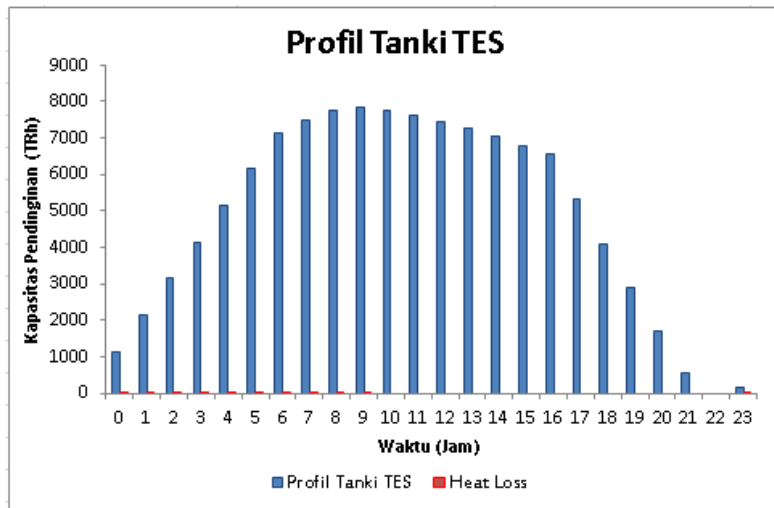
Gambar 12 Hasil simulasi profil TES *tank* kombinasi 1,3

Hasil Simulasi Kombinasi 1,4

Waktu (Jam)	Beban Pendinginan (TR)	Kapasitas Chiller (TR)	<i>Charging dan Discharging</i> (TR)	<i>Heat Loss</i> (TR)	Kapasitas TES <i>tank</i> (TR)	Biaya konsumsi listrik menggunakan TES (Rp)	Biaya konsumsi listrik tanpa TES (Rp)
0	0	1000	1000	20	1143	714000	0
1	0	1000	1000	20	2143	714000	0
2	0	1000	1000	20	3143	714000	0
3	0	1000	1000	20	4143	714000	0
4	0	1000	1000	20	5143	714000	0
5	0	1000	1000	20	6143	714000	0
6	0	1000	1000	20	7143	714000	0
7	671	1000	329	7	7472	726680	487780
8	731	1000	269	5	7741	726232	530973
9	894	1000	106	2	7847	725318	648342
10	1094	1000	-94	0	7752	724565	792942
11	1140	1000	-140	0	7612	724430	826081
12	1173	1000	-173	0	7439	724339	849940
13	1199	1000	-199	0	7240	724272	868498
14	1220	1000	-220	0	7020	724219	883560
15	1253	1000	-253	0	6767	724141	907130
16	1219	1000	-219	0	6548	724221	883078
17	1218	0	-1218	0	5330	241698	1764229
18	1251	0	-1251	0	4079	247502	1811476
19	1183	0	-1183	0	2896	234145	1714111
20	1181	0	-1181	0	1714	233748	1711220
21	1181	0	-1181	0	533	233748	1711220
22	533	0	-533	0	0	105467	776129
23	0	143	143	3	143	80132	0
Jumlah	17143	17143	0	157	7847	13622856	17166711



Gambar 13 Hasil Simulasi kombinasi 1,4

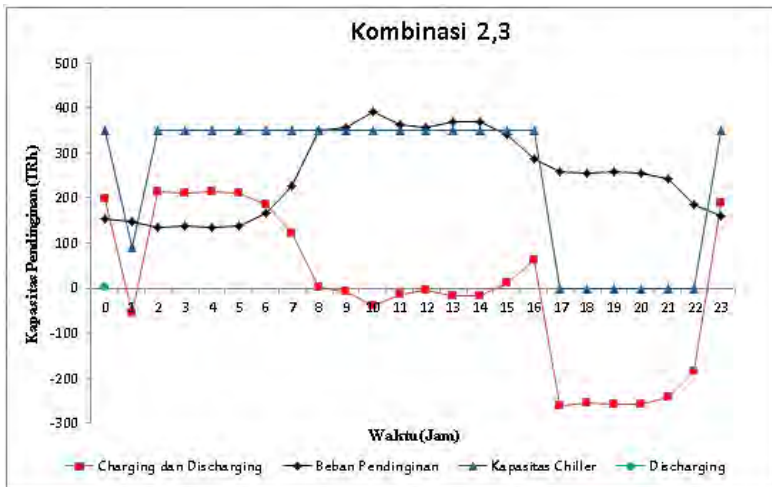


Gambar 14 Hasil simulasi profil TES tank Kombinasi 1,4

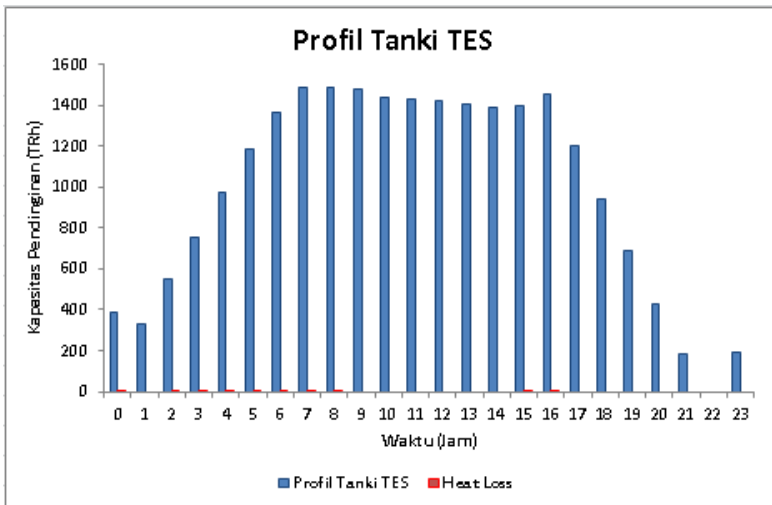


Hasil Simulasi Kombinasi 2,3

Waktu (Jam)	Beban Pendinginan (TR)	Kapasitas Chiller (TR)	<i>Charging dan Discharging</i> (TR)	<i>Heat Loss</i> (TR)	Kapasitas TES <i>tank</i> (TR)	Biaya konsumsi listrik menggunakan TES (Rp)	Biaya konsumsi listrik tanpa TES (Rp)
0	153	350	197	4	387	249900	85884
1	146	91	-55	0	332	64915	81792
2	135	350	215	4	547	249900	75654
3	139	350	211	4	758	249900	77588
4	136	350	214	4	972	249900	76108
5	139	350	211	4	1183	249900	77923
6	166	350	184	4	1367	249900	92897
7	227	350	123	2	1490	258088	167313
8	349	350	1	0	1491	256106	255378
9	358	350	-8	0	1483	256012	261960
10	391	350	-41	0	1442	255711	285635
11	364	350	-14	0	1428	255956	266051
12	356	350	-6	0	1423	256036	260207
13	369	350	-19	0	1404	255909	269558
14	368	350	-18	0	1386	255917	268973
15	339	350	11	0	1396	256209	248518
16	288	350	62	1	1459	256892	211115
17	260	0	-260	0	1199	51570	382201
18	255	0	-255	0	944	50384	374613
19	257	0	-257	0	687	50953	378756
20	256	0	-256	0	430	50753	377300
21	244	0	-244	0	187	48227	358885
22	187	0	-187	0	0	36937	276593
23	160	350	190	0	190	195993	89522
Jumlah	6041	6041	0	25	1491	4611967	5300424



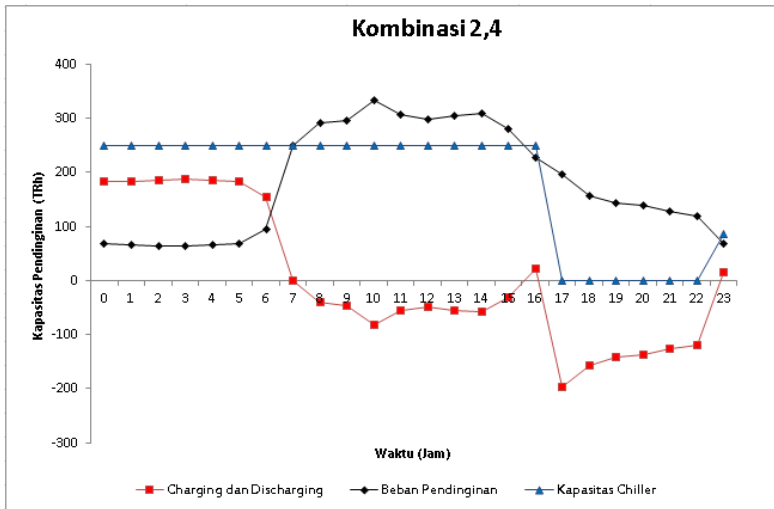
Gambar 15 Hasil simulasi kombinasi 2,3



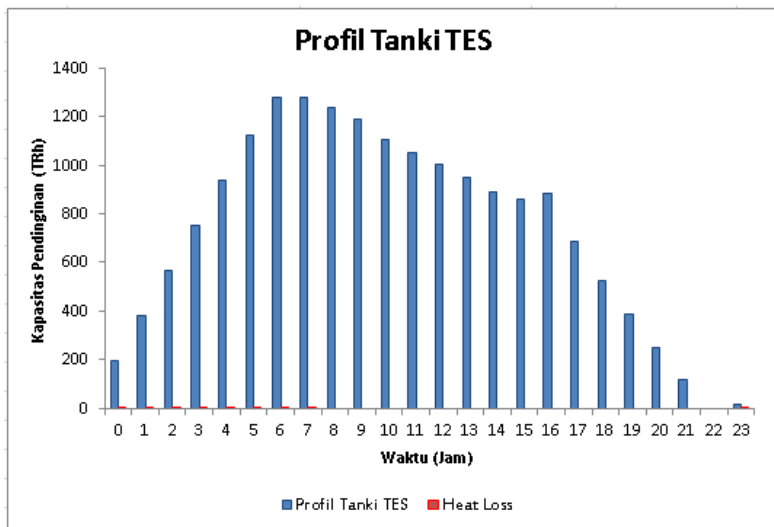
Gambar 16 Hasil Simulai TES tank kombinasi 2,3

Hasil Simulasi Kombinasi 2,4

Waktu (Jam)	Beban Pendinginan (TR)	Kapasitas Chiller (TR)	<i>Charging dan Discharging</i> (TR)	<i>Heat Loss</i> (TR)	Kapasitas TES <i>tank</i> (TR)	Biaya konsumsi listrik menggunakan TES (Rp)	Biaya konsumsi listrik tanpa TES (Rp)
0	68	250	182	4	198	178500	38118
1	66	250	184	4	381	178500	37210
2	64	250	186	4	567	178500	35849
3	63	250	187	4	754	178500	35395
4	65	250	185	4	939	178500	36302
5	68	250	182	4	1121	178500	38118
6	95	250	155	3	1276	178500	53092
7	250	250	0	0	1277	183976	183876
8	291	250	-41	0	1235	183456	213627
9	297	250	-47	0	1189	183397	217615
10	333	250	-83	0	1106	183062	243576
11	306	250	-56	0	1050	183306	224116
12	298	250	-48	0	1002	183381	218753
13	305	250	-55	0	948	183317	223285
14	308	250	-58	0	889	183279	226074
15	280	250	-30	0	859	183578	205812
16	227	250	23	0	882	184338	167733
17	197	0	-197	0	685	39086	291460
18	157	0	-157	0	528	31027	233509
19	143	0	-143	0	385	28253	213290
20	138	0	-138	0	247	27375	206892
21	127	0	-127	0	120	25130	190528
22	120	0	-120	0	0	23687	180008
23	69	85	16	0	16	8863	38571
Jumlah	4335	4335	0	26	1277	3268011	3752807



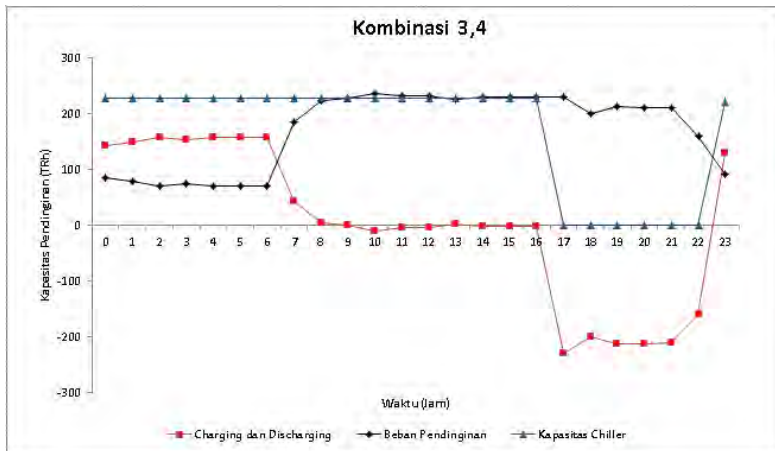
Gambar 17 Hasil simulasi Kombinasi 2,4



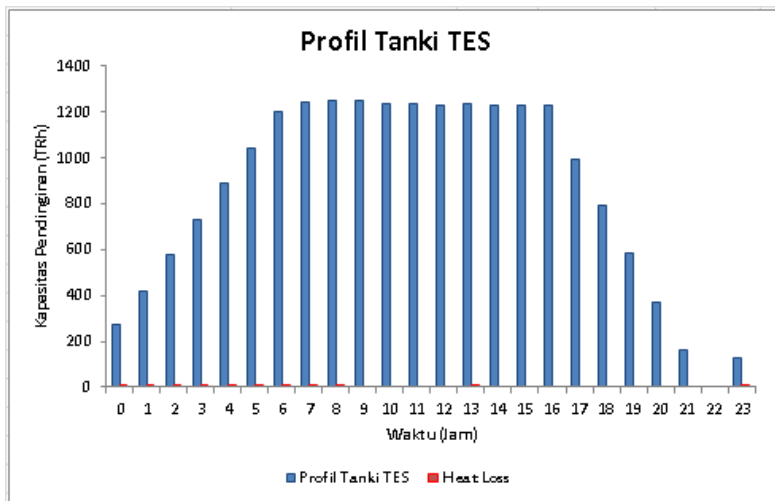
Gambar 18 Hasil simulasi TES tank kombinasi 2,4

Hasil Simulasi Kombinasi 3,4

Waktu (Jam)	Beban Pendinginan (TR)	Kapasitas Chiller (TR)	<i>Charging dan Discharging</i> (TR)	<i>Heat Loss</i> (TR)	Kapasitas TES <i>tank</i> (TR)	Biaya konsumsi listrik menggunakan TES (Rp)	Biaya konsumsi listrik tanpa TES (Rp)
0	85	228	143	3	273	162792	47766
1	80	228	148	3	421	162792	44582
2	71	228	157	3	578	162792	39805
3	75	228	153	3	731	162792	42194
4	71	228	157	3	888	162792	39805
5	71	228	157	3	1045	162792	39805
6	71	228	157	3	1201	162792	39805
7	185	228	43	1	1244	168960	137121
8	224	228	4	0	1249	168180	164934
9	229	228	-1	0	1248	168099	168492
10	237	228	-9	0	1239	167963	174880
11	232	228	-4	0	1235	168046	170902
12	233	228	-5	0	1230	168036	171384
13	226	228	2	0	1233	168143	166565
14	231	228	-3	0	1230	168067	169938
15	231	228	-3	0	1227	168063	170131
16	230	228	-2	0	1225	168078	169456
17	230	0	-230	0	995	45631	339035
18	201	0	-201	0	795	39719	296874
19	212	0	-212	0	582	42004	313525
20	212	0	-212	0	371	41888	312684
21	210	0	-210	0	161	41607	310634
22	161	0	-161	0	0	31761	238861
23	91	221	130	3	130	72823	50951
Jumlah	4097	4097	1225	25	1249	3136614	3820127



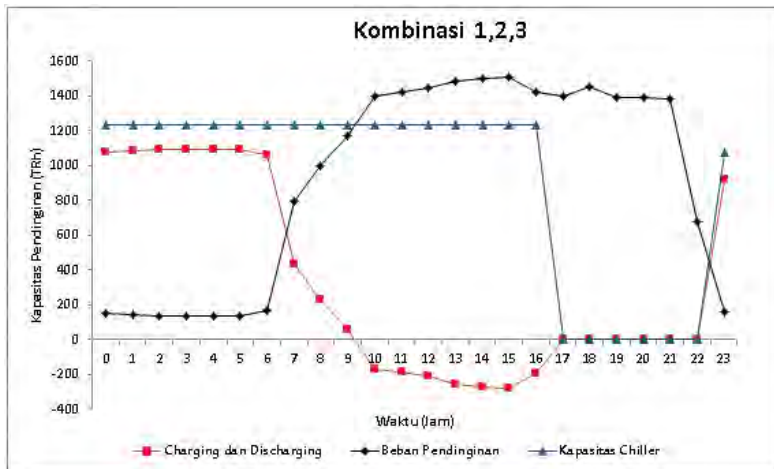
Gambar 19 Hasil simulasi Kombinasi 3,4



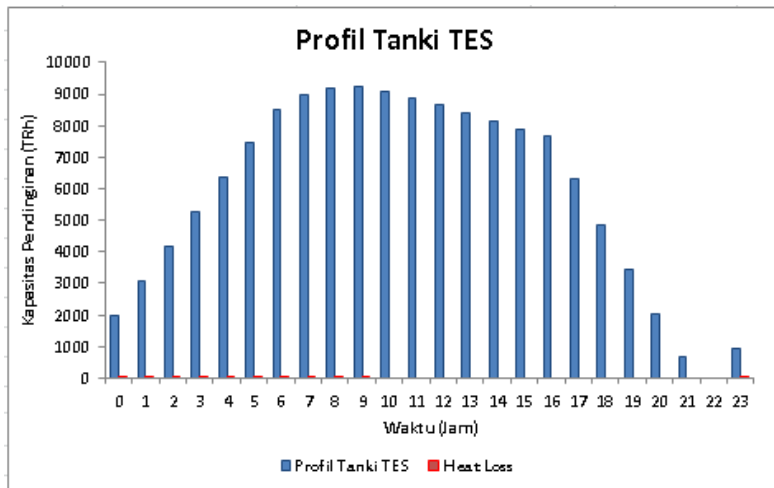
Gambar 20 Hasil simulasi profil TES *tank* kombinasi 3,4

Hasil Simulasi Kombinasi 1,2,3

Waktu (Jam)	Beban Pendinginan (TR)	Kapasitas Chiller (TR)	<i>Charging dan Discharging</i> (TR)	<i>Heat Loss</i> (TR)	Kapasitas TES <i>tank</i> (TR)	Biaya konsumsi listrik menggunakan TES (Rp)	Biaya konsumsi listrik tanpa TES (Rp)
0	153	1230	1077	22	1995	878220	85884
1	146	1230	1084	22	3079	878220	81792
2	135	1230	1095	22	4174	878220	75654
3	139	1230	1091	22	5266	878220	77588
4	136	1230	1094	22	6360	878220	76108
5	139	1230	1091	22	7451	878220	77923
6	166	1230	1064	21	8515	878220	92897
7	794	1230	436	9	8951	892775	576416
8	997	1230	233	5	9183	891617	722923
9	1168	1230	62	1	9245	890953	846392
10	1396	1230	-166	0	9079	890324	1010331
11	1417	1230	-187	0	8892	890275	1025813
12	1442	1230	-212	0	8680	890221	1043346
13	1487	1230	-257	0	8423	890125	1076074
14	1502	1230	-272	0	8151	890094	1087178
15	1506	1230	-276	0	7874	890086	1090101
16	1422	1230	-192	0	7682	890264	1029320
17	1394	0	-1394	0	6288	276694	2018611
18	1454	0	-1454	0	4834	287705	2104533
19	1392	0	-1392	0	3442	275445	2015166
20	1391	0	-1391	0	2051	275246	2013710
21	1378	0	-1378	0	673	272719	1995295
22	673	0	-673	0	0	133148	977912
23	160	1079	919	18	919	514476	89522
Jumlah	21989	21989	7682	185	9245	17089707	21290488



Gambar 21 Hasil simulasi kombinasi 1,2,3

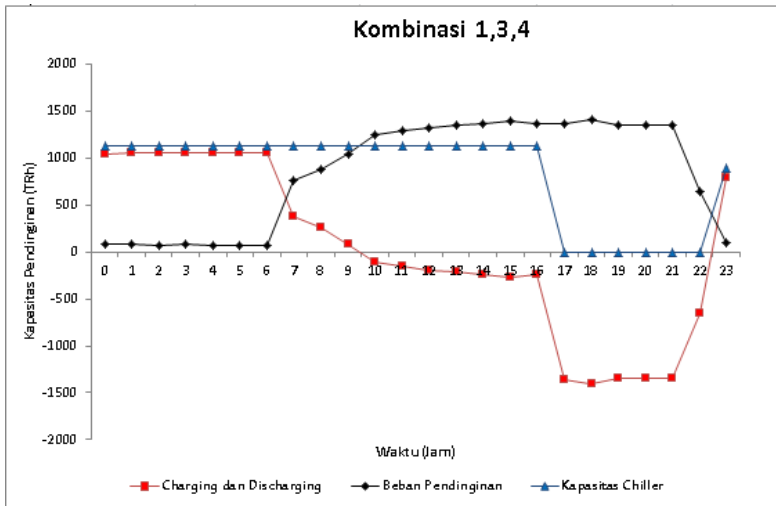


Gambar 22 Hasil simulasi profil TES *tank* untuk kombinasi 1,2,3

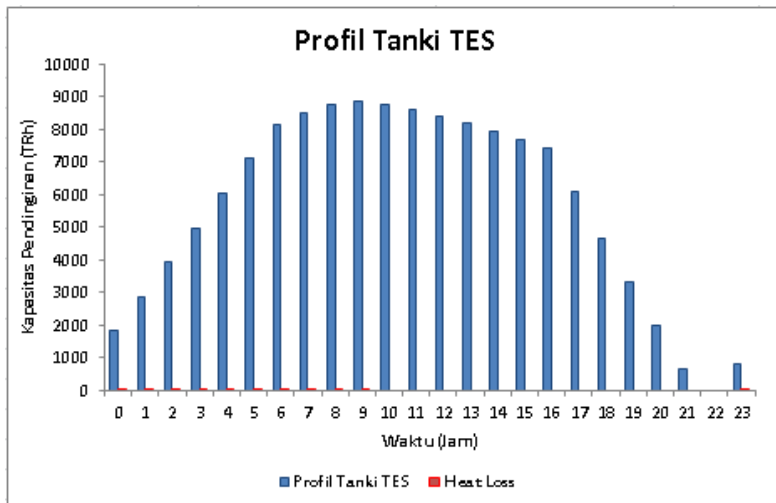


Hasil Simulasi Kombinasi 1,3,4

Waktu (Jam)	Beban Pendinginan (TR)	Kapasitas Chiller (TR)	<i>Charging dan Discharging</i> (TR)	<i>Heat Loss</i> (TR)	Kapasitas TES tank (TR)	Biaya konsumsi listrik menggunakan TES (Rp)	Biaya konsumsi listrik tanpa TES (Rp)
0	85	1127	1042	21	1836	804678	47766
1	80	1127	1047	21	2884	804678	44582
2	71	1127	1056	21	3940	804678	39805
3	75	1127	1052	21	4991	804678	42194
4	71	1127	1056	21	6047	804678	39805
5	71	1127	1056	21	7103	804678	39805
6	71	1127	1056	21	8159	804678	39805
7	752	1127	375	7	8534	818304	546224
8	872	1127	255	5	8789	817550	632480
9	1039	1127	88	2	8877	816787	752924
10	1242	1127	-115	0	8762	816135	899576
11	1285	1127	-158	0	8604	816023	930663
12	1318	1127	-191	0	8412	815942	954523
13	1344	1127	-217	0	8195	815882	973081
14	1365	1127	-238	0	7957	815835	988143
15	1398	1127	-271	0	7686	815764	1011713
16	1364	1127	-237	0	7449	815836	987661
17	1364	0	-1364	0	6084	270755	1975445
18	1400	0	-1400	0	4684	277041	2026793
19	1347	0	-1347	0	3338	266497	1949935
20	1346	0	-1346	0	1991	266381	1949094
21	1345	0	-1345	0	647	266100	1947044
22	647	0	-647	0	0	127972	940180
23	91	886	795	16	795	674535	69292
Jumlah	20045	20045	0	178	8877	15946085	19828533



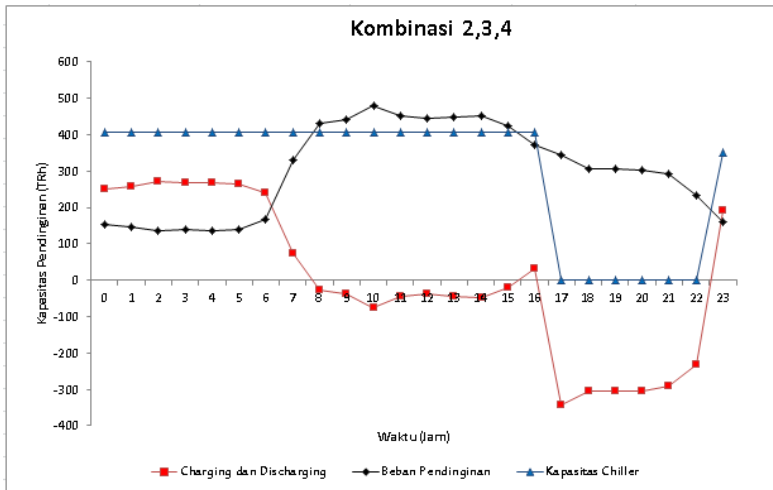
Gambar 23 Hasil simulai kombinasi 1,3,4



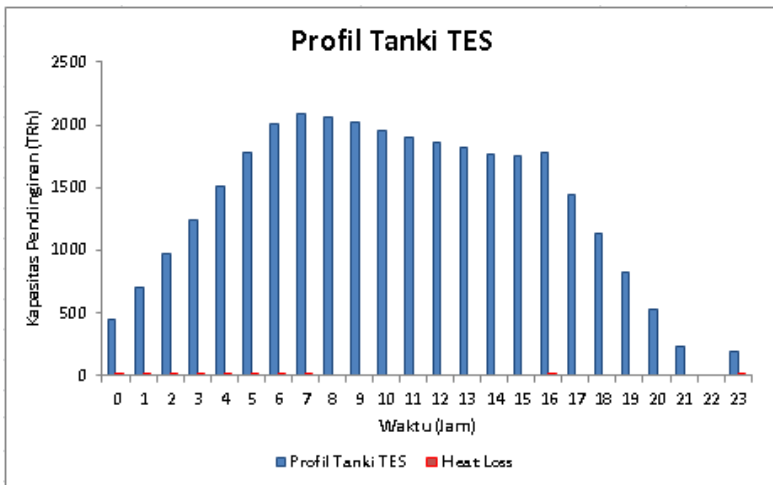
Gambar 24 Hasil simulasi profil TES *tank* kombinasi 1,3,4

Hasil Simulasi Kombinasi 2,3,4

Waktu (Jam)	Beban Pendinginan (TR)	Kapasitas Chiller (TR)	<i>Charging dan Discharging</i> (TR)	<i>Heat Loss</i> (TR)	Kapasitas TES <i>tank</i> (TR)	Biaya konsumsi listrik menggunakan TES (Rp)	Biaya konsumsi listrik tanpa TES (Rp)
0	153	405	252	5	443	289170	85884
1	146	405	259	5	702	289170	81792
2	135	405	270	5	972	289170	75654
3	139	405	266	5	1238	289170	77588
4	136	405	269	5	1507	289170	76108
5	139	405	266	5	1773	289170	77923
6	166	405	239	5	2012	289170	92897
7	331	405	74	1	2087	296584	242319
8	432	405	-27	0	2060	295533	315133
9	442	405	-37	0	2023	295457	322198
10	480	405	-75	0	1948	295185	350210
11	451	405	-46	0	1902	295390	328698
12	443	405	-38	0	1864	295445	323336
13	450	405	-45	0	1819	295398	327868
14	453	405	-48	0	1771	295370	330657
15	425	405	-20	0	1750	295587	310394
16	372	405	33	1	1783	296082	272316
17	343	0	-343	0	1440	68144	502676
18	306	0	-306	0	1133	60565	448826
19	306	0	-306	0	827	60605	449113
20	303	0	-303	0	524	60008	444766
21	290	0	-290	0	233	57482	426351
22	233	0	-233	0	0	46193	344059
23	160	351	191	4	191	107215	89522
Jumlah	7236	7236	0	41	2087	5440433	6396287



Gambar 25 Hasil simulasi kombinasi 2,3,4



Gambar 26 hasil simulasi profil TES tank kombinasi 2,3,4